YALE
MEDICAL LIBRARY

HISTORICAL
LIBRARY

MÉMOIRES

DE

L'ACADÉMIE DES SCIENCES

DE

L'INSTITUT DE FRANCE

TOME QUARANTE-SIXIÈME

PARIS

TYPOGRAPHIE DE FIRMIN-DIDOT ET Cie

IMPRIMEURS DE L'INSTITUT DE FRANCE, RUE JACOB, 56

M D CCCC III

MÉMOIRES

DE

L'ACADÉMIE DES SCIENCES

DE

L'INSTITUT DE FRANCE

MÉMOIRES

DE

L'ACADÉMIE DES SCIENCES

DE

L'INSTITUT DE FRANCE

TOME QUARANTE-SIXIÈME

PARIS

TYPOGRAPHIE DE FIRMIN-DIDOT ET Cie

IMPRIMEURS DE L'INSTITUT, RUE JACOB, 56

M DCCCC III

Hist
QC721
1903 B
locked

RECHERCHES

SUR UNE

PROPRIÉTÉ NOUVELLE DE LA MATIÈRE

ACTIVITÉ RADIANTE SPONTANÉE OU RADIOACTIVITÉ
DE LA MATIÈRE

PAR

M. HENRI BECQUEREL

MEMBRE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

AVANT-PROPOS

Les premières expériences relatives à la découverte et à l'étude des phénomènes dont il va être question ont été publiées dans les *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences* il y a sept ans. Le détail des recherches poursuivies en 1896 et 1897 devait faire à cette époque l'objet d'un premier Mémoire. Le désir d'élucider quelques expériences contradictoires, et l'obligation de ne pas abandonner un autre travail en cours d'exécution, ne me laissèrent pas le loisir de faire cette publication.

En 1898, les travaux que M. et Mme Curie entreprirent

à la suite des miens firent connaître des produits qui manifestèrent les mêmes phénomènes avec une intensité considérablement plus grande. Les faits nouveaux se présentèrent alors avec une telle profusion et se succédèrent avec une telle rapidité qu'il devint nécessaire de s'adonner exclusivement à leur constatation, en remettant à une époque ultérieure une rédaction qui donnât aux faits observés un cadre plus complet.

Ces circonstances expliquent pourquoi je publie seulement aujourd'hui ce travail, au début duquel on rencontrera des observations anciennes remontant à six ou sept années, et dont quelques-unes n'ont déjà plus qu'un intérêt rétrospectif. J'ai cru cependant devoir exposer celles-ci avec les divers détails qui auraient été donnés au moment où elles ont été faites, car elles marquent les étapes successives des progrès réalisés dans la voie nouvelle que ces expériences venaient d'ouvrir.

Le présent Mémoire a été divisé en deux parties. La première comprend des recherches faites en 1896 et 1897 dans lesquelles après avoir découvert les propriétés radiantes de l'uranium, j'ai étudié les caractères physiques du rayonnement nouveau.

La seconde renferme mes travaux depuis 1898, époque à laquelle les nouveaux produits découverts par M. et Mme Curie donnèrent à la question une extension considérable en révélant des phénomènes que le faible rayonnement de l'uranium eût été, sinon impuissant, du moins beaucoup plus lent à manifester.

L'idée de rechercher si les corps pouvaient émettre un

rayonnement invisible et pénétrant m'a été suggérée par l'annonce des premières expériences de M. Röntgen. Rien n'autorisait à cette époque à ne pas attribuer le phénomène présumé à une forme nouvelle d'un mode connu de transformation de l'énergie. Contrairement à toute attente, les premières expériences ont mis en évidence le fait nouveau d'une production d'énergie en apparence *spontanée*, c'est-à-dire sans cause connue.

Les travaux poursuivis depuis plusieurs années par de nombreux observateurs ont accumulé des faits dont l'ensemble a constitué une branche scientifique nouvelle; mais la cause première des phénomènes reste encore, comme au premier jour, une énigme du plus haut intérêt.

Dans la séance de l'Académie des Sciences du 20 janvier 1896, au moment où M. H. Poincaré venait de montrer les premières radiographies envoyées par M. Röntgen, je demandai à mon confrère si l'on avait déterminé quel était, dans l'ampoule vide productrice des rayons X, le lieu d'émission de ces rayons. Il me fut répondu que l'origine du rayonnement était la tache lumineuse de la paroi qui recevait le flux cathodique. Je pensai aussitôt à rechercher si l'émission nouvelle n'était pas une manifestation du mouvement vibratoire qui donnait naissance à la phosphorescence, et si tout corps phosphorescent n'émettait pas de semblables rayons. Je fis part de cette idée et de ce projet à M. Poincaré, et dès le lendemain je commençai, dans cet ordre d'idées, une série d'expériences dont il sera dit plus loin quelques mots; celles-ci ne confirmèrent pas la prévision qui les avait fait entreprendre.

M. Poincaré écrivait alors pour le numéro du 30 janvier 1896 de la *Revue générale des Sciences,* un article sur les rayons de Röntgen; à la suite des diverses hypothèses qui se présentaient à l'esprit pour concevoir la nature de ces rayons il ajouta (1) : « Ainsi c'est le verre qui émet les rayons de Röntgen, et il les émet en devenant fluorescent. Ne peut-on alors se demander si tous les corps dont la fluorescence est suffisamment intense n'émettent pas, outre les rayons lumineux, des rayons X de Röntgen, quelle que soit la cause de leur fluorescence. Ces phénomènes ne seraient plus alors liés à une cause électrique. Cela n'est pas très probable, mais cela est possible et sans doute assez facile à vérifier. » La publication de ce rapprochement suscita immédiatement un grand nombre d'expériences.

Si l'on suit l'ordre des publications, il faut mentionner d'abord une expérience de M. Ch. Henry (2) qui plaça sur une plaque photographique enveloppée de papier noir un fil de fer, puis sur le fil plusieurs pièces de monnaie, et sur l'une des pièces un peu de sulfure de zinc phosphorescent préparé par lui. Il exposa le tout aux rayons X; puis, en développant la radiographie, il constata que l'ombre du fil apparaissait légèrement sous la pièce recouverte de sulfure de zinc phosphorescent. Il en conclut que ce corps avait émis des rayons traversant le métal et impressionnant la plaque photographique. L'épreuve que j'ai eu

(1) *Revue générale des Sciences,* t. VII, p. 56, 1896.

(2) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXII, p. 312, 10 février 1896.

l'occasion de voir n'a pas entraîné ma conviction, d'autant plus qu'une légère pression eût suffi pour donner un résultat analogue. Aucune expérience n'est venue depuis confirmer cette observation. Une autre expérience de M. Ch. Henry relative à l'action de rayons émis par la blende hexagonale au travers de feuilles d'aluminium et de carton pourrait être rapprochée d'une expérience faite ultérieurement par M. Troost et dont il sera question dans le chapitre II, mais l'expérience de M. Ch. Henry ne présente pas assez de netteté pour qu'on puisse affirmer qu'il s'agisse du même phénomène.

On doit mentionner ici, pour n'y plus revenir, et comme ayant été rattachées à tort au nouveau phénomène, diverses expériences de M. G. Le Bon (1). Il s'agissait d'impressions photographiques attribuées à des rayons issus de sources lumineuses, et que l'auteur a appelés la « lumière noire »; ces rayons, capables de traverser des écrans métalliques, sont arrêtés par une feuille de papier noir.

Ces expériences affectent pour la plupart une complication qui masque la véritable cause des faits observés. Dans les cas simples ceux-ci apparaissent comme des conséquences des phénomènes connus.

Les conclusions sont exposées en termes peu précis et d'une généralité telle qu'ils peuvent s'appliquer éventuellement à des phénomènes d'un tout autre ordre. L'auteur a cru pouvoir s'appuyer sur ces conclusions pour élever des

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXII (1896), p. 188, 27 janvier; p. 233, 3 février; p. 386, 17 février; et p. 462, 24 février.

revendications de priorité à l'occasion de plusieurs des découvertes qui ont été réalisées plus tard dans le domaine qui nous occupe. Il suffit de relire dans les *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences* les premières publications de M. G. Le Bon pour se convaincre qu'au moment où il les a faites, l'auteur n'avait aucune idée des phénomènes de radioactivité.

Les conclusions des expériences de M. Le Bon ont été réfutées tout d'abord par M. Niewenglowski (1), puis par M. Lumière (2). Plus tard, M. Perrigot (3) montra que diverses expériences sur la « lumière noire » étaient des effets dus à des rayons infra-rouges traversant l'ébonite, corps qui se comporte comme un verre rouge très foncé. J'ai eu l'occasion (4) de vérifier et de compléter cette observation.

De toutes ces publications une seule mérite d'attirer tout particulièrement l'attention, c'est une note de M. Niewenglowski (5) contenant l'observation suivante : un écran enduit d'une poudre de sulfure de calcium phosphorescent (au bismuth), après avoir été insolé, émit des radiations qui ont impressionné une plaque photographique au travers du carton et du papier noir.

J'ai été conduit à répéter une expérience analogue dont les anomalies remarquables seront développées plus loin; mais ce phénomène ne paraît pas être le même que

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXII (1896), p. 232, 3 février; p. 385, 17 février.

(2) *Id.*, t. CXXII (1896), p. 463, 24 février 1896.

(3) *Id.*, t. CXXIV (1897), p. 857 et 1087.

(4) *Id.*, t. CXXIV (1897), p. 984.

(5) *Id.*, t. CXXII, p. 385, 17 fév. 1896.

celui dont il va être question dans ce travail et qui constitue la radioactivité.

Telles étaient les publications qui ont précédé la première observation que j'ai faite sur les propriétés radiantes des sels d'uranium, et qui a été publiée dans la séance de l'Académie des Sciences du 24 février 1896.

On a vu plus haut qu'antérieurement à ces diverses publications j'avais entrepris des recherches dans la même voie.

Dans une première série d'expériences des plaques photographiques, enveloppées de papier noir, avaient été exposées au rayonnement de substances phosphorescentes enfermées dans des tubes où le gaz était assez peu raréfié pour ne pas donner de rayons X. La durée de la pose, limitée par l'obligation d'entretenir la décharge dans les tubes, était de quelques quarts d'heure, et l'expérience a appris depuis que cette pose était insuffisante pour révéler un effet faible, effet qui eût été intercepté au moins partiellement par le verre du tube.

Dans une autre série, la phosphorescence de corps inaltérables à l'air, tels que le spath fluor, la blende hexagonale phosphorescente, avait été excitée par des étincelles et dans ces expériences, faites avec tout le soin possible, on n'avait obtenu aucune action en déposant ces substances sur une plaque photographique enveloppée de papier noir, soit en les excitant pendant la pose, soit en laissant l'action présumée se continuer longtemps après que l'excitation eût cessé. Bien que la pose eût été prolongée pendant plusieurs heures, cette durée était encore

trop courte. En outre, j'hésitais à exposer à l'air les belles préparations de sulfures phosphorescents que je possédais parce qu'elles s'altèrent dans ces circonstances; il en était de même pour les sels déliquescents d'uranium.

Cependant, malgré les expériences négatives sur les autres corps, je fondais de grandes espérances sur l'expérimentation avec les sels d'uranium, dont j'avais eu autrefois l'occasion, à la suite des travaux de mon père, d'étudier la phosphorescence. Ces corps, qui émettent et absorbent toute une série de radiations lumineuses harmoniques, paraissent avoir une constitution moléculaire particulièrement remarquable, du moins au point de vue de la phosphorescence et de l'absorption.

Parmi les préparations de sels d'uranium que je possédais, il y avait de très belles lamelles de sulfate double d'uranyle et de potassium que j'avais préparées une quinzaine d'années auparavant. Ces cristaux, inaltérables à l'air, convenaient parfaitement pour les expériences projetées; mais je ne les avais pas alors à ma disposition, les ayant prêtés à mon confrère M. Lippmann en vue de l'obtention d'une photographie interférentielle qui donna, du reste, de fort belles épreuves.

Le jour même où M. Lippmann me rendit ces lamelles cristallines je fis la première observation d'où découlent toutes les recherches qui vont suivre.

Toutes les expériences, sauf une série de mesures électriques dont il sera question au chapitre III, ont été exécutées dans le laboratoire de physique du Muséum d'Histoire naturelle.

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE PREMIER

RAYONNEMENT DE L'URANIUM ET DES SELS DE CE MÉTAL

§ 1. — *Premières observations.*

Février-Juin 1896.

Les faits qui sont exposés dans ce chapitre pourraient être résumés plus brièvement. Je crois cependant devoir les présenter dans l'ordre chronologique de leur découverte afin de montrer comment, en présence d'un phénomène d'un ordre nouveau, j'ai été conduit à modifier, puis à abandonner les premières idées sous l'influence desquelles j'avais entrepris cette étude. Au cours de ces expériences et tout au début, j'ai rencontré des phénomènes dont quelques-uns n'ont pu être reproduits, dont l'explication est encore inconnue, et qui m'ont maintenu pendant plusieurs mois dans des idées qu'il eût été plus profitable d'abandonner de suite. Ces faits particuliers et les anomalies qui les caractérisent seront exposés dans le chapitre suivant.

On a vu plus haut que l'origine de ces expériences avait été l'idée de rechercher si les corps phosphorescents, après avoir été excités par la lumière, émettaient des rayons pénétrants.

Dans ce but, après les divers essais négatifs mentionnés plus haut, deux lamelles de sulfate double d'uranium et de potassium furent déposées sur une plaque photographique, enveloppée d'une double feuille de papier noir épais; entre l'une d'elles et la plaque on plaça une pièce d'argent, et le tout fut exposé au soleil (ce que l'avenir montra être absolument inutile). Après une pose de quelques heures, le développement de la plaque fit apparaître une légère impression figurant les silhouettes des lamelles, et l'ombre produite par la pièce métallique.

L'expérience fut recommencée aussitôt en interposant entre la plaque enveloppée et le sel d'uranium une lame mince de verre de $0^{mm},10$ d'épaisseur, ou une lamelle de mica, pour arrêter tout phénomène dû à une vapeur; le résultat fut le même avec une impression un peu plus faible. Ce furent les premiers résultats communiqués à l'Académie des Sciences le 24 février 1896 (1).

La durée de la persistance lumineuse des sels d'uranium ne dépassant pas un centième de seconde, il semblait nécessaire de soumettre le corps actif à une excitation continue pendant les expériences en l'exposant, soit au soleil, soit à une autre source lumineuse. On disposa alors les expériences suivantes dont la description a

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXII, p. 420.

été donnée en ces termes dans la séance du 2 mars 1896 (1) :

« Une plaque photographique Lumière, au gélatino-bromure d'argent, a été enfermée dans un châssis opaque en toile noire fermé d'un côté par une plaque d'aluminium (épaisseur, 2 millimètres); si l'on exposait le châssis en plein soleil même pendant une journée entière, la plaque ne serait pas voilée ; mais si l'on vient à fixer sur la plaque d'aluminium, à l'extérieur, une lamelle du sel d'uranium, que l'on peut, par exemple, assujettir avec des bandes de papier, et si l'on expose le tout pendant plusieurs heures au soleil, on reconnaît, lorsqu'on développe ensuite la plaque par les procédés ordinaires, que la silhouette de la lame cristalline apparaît en noir sur la plaque sensible, et que le sel d'argent a été réduit en face de la lamelle phosphorescente. Si la lame d'aluminium est un peu épaisse l'action est moindre qu'au travers de deux feuilles de papier noir.

« Si entre la lamelle du sel d'uranium et la lame d'aluminium, ou le papier noir, on interpose un écran formé d'une lame de cuivre de $0^{mm},10$ environ d'épaisseur, par exemple en forme de croix, on observe dans l'image la silhouette de cette croix en plus clair, mais avec une teinte indiquant cependant que les radiations ont traversé la lame en cuivre. » Dans une autre expérience, une lame de cuivre plus mince ($0^{mm},04$) a affaibli beaucoup moins les radiations actives...

« J'insisterai particulièrement sur le fait suivant qui me paraît tout à fait important et en dehors des phénomènes

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXII, p. 501.

que l'on pouvait s'attendre à observer : les mêmes lamelles cristallines, placées en regard de plaques photographiques, dans les mêmes conditions et au travers des mêmes écrans, mais à l'abri de l'excitation des radiations incidentes, et maintenues à l'obscurité, produisent encore les mêmes impressions photographiques. Voici comment j'ai été conduit à faire cette observation : parmi les expériences qui précèdent, quelques-unes avaient été préparées le mercredi 26 et le jeudi 27 février, et comme ces jours-là le soleil ne s'est montré que d'une manière intermittente j'avais conservé les expériences toutes préparées et rentré les châssis à l'obscurité dans le tiroir d'un meuble, en laissant en place les lamelles du sel d'uranium. Le soleil ne s'étant pas montré les jours suivants, j'ai développé les plaques photographiques le 1er mars, en m'attendant à trouver des images très faibles. Les silhouettes apparurent, au contraire, avec une grande intensité. Je pensai aussitôt que l'action avait dû continuer à l'obscurité et je disposai l'expérience suivante : »

Suit alors la description d'expériences identiques aux précédentes, répétées à l'abri de toute excitation lumineuse, et donnant lieu aux mêmes résultats. J'ajoutai alors qu' « il importe d'observer que ce phénomène ne paraît pas devoir être attribué à des radiations lumineuses émises par phosphorescence puisque au bout d'un centième de seconde ces radiations sont devenues si faibles qu'elles ne sont presque plus perceptibles ».

Cette observation constitue le fait fondamental nouveau d'une émission de rayons pénétrants sans cause excitatrice apparente. L'une des épreuves mentionnées dans la

description ci-dessus est reproduite dans la Pl. I, fig. 1.

L'absence de cause excitatrice connue sur un produit préparé depuis plusieurs années permettait de penser que le phénomène observé eût été le même à quelque époque que l'on eût fait l'expérience. Dans les idées qui avaient alors cours dans la science on pouvait songer à invoquer un emmagasinement d'énergie due à une longue exposition à la lumière diffuse, sinon le phénomène constituait un fait d'un ordre tout nouveau. Suivant la première hypothèse l'émission eût dû s'affaiblir avec le temps, tandis que, si aucune cause excitatrice extérieure n'intervenait, le phénomène devait paraître permanent.

Pour élucider ce point fondamental, j'ai disposé sur une même plaque photographique divers composés de sesquioxyde d'uranium, des sulfates doubles d'uranyle et de potassium, de sodium, d'ammonium, formant des croûtes cristallines minces; puis un cristal de nitrate d'urane, et un morceau de blende hexagonale très phosphorescente. La plaque photographique était enveloppée de papier noir, et les substances fixées chacune sur une lamelle de verre de $0^{mm},2$ environ d'épaisseur. Pour le nitrate qui doit être soustrait à l'action de l'humidité de l'air, le cristal avait été placé sur une lamelle de verre identique aux précédentes, puis coiffé d'une petite cloche de verre formée par un bout de tube fermé à la lampe, et scellé à la plaque de verre par de la paraffine. Cette disposition a servi également pour enfermer à l'abri de l'air diverses autres substances dont on parlera plus loin. Elle est représentée dans la Pl. II, fig. 7. Ces substances ont été déposées sur la plaque photographique le 3 mars 1896, à

4 heures du soir. Elles étaient depuis longtemps exposées à la lumière diffuse, et depuis lors elles ont été maintenues constamment à l'obscurité.

La plaque, développée le 5 mars, à 4 h. 30 m., au bout de quarante-huit heures, a manifesté des actions à peu près équivalentes pour les divers sels d'uranium étudiés; la blende hexagonale n'a donné aucune impression.

Les mêmes substances, après avoir été retirées de la première plaque photographique, ont été disposées le même jour dans le même ordre sur une seconde plaque, de la même douzaine, enveloppée du même papier noir et dans les mêmes conditions. Cette seconde plaque, après une nouvelle pose de quarante-cinq heures, a donné des résultats aussi nets et des images aussi intenses que la première. Une troisième épreuve, puis une série d'autres obtenues d'une manière ininterrompue pendant plusieurs semaines ont fourni des impressions toujours aussi intenses. Dans ces épreuves les lamelles cristallines donnent des images nettes de leurs silhouettes, au travers des minces lamelles de verre. Les images produites par les sels recouverts d'une cloche donnent tout autour de leur propre silhouette une impression correspondant à la projection de la cloche qui les recouvre. Ce phénomène que j'ai d'abord pris pour un phénomène de réflexion est dû à un phénomène secondaire qui sera étudié dans un des chapitres suivants.

Du 3 mars au 3 mai les substances dont il vient d'être question avaient été enfermées dans une boîte en carton opaque et avaient continué à émettre le même rayonnement sans affaiblissement sensible; le 3 mai, on reprit avec ces

mêmes échantillons une nouvelle série d'expériences. On les enferma dans une première boîte en plomb épais, d'où ils ne sont pas sortis depuis. Un peu au-dessus du fond de cette boîte était tendue une feuille de papier noir sur laquelle les substances ont été déposées une fois pour toutes munies de leurs lamelles de verre comme il a été dit plus haut. Aux échantillons de sulfates doubles et au nitrate, recouverts chacun d'un petit tube, on avait joint, sous des tubes identiques, de l'oxyde jaune d'urane, du sulfate uraneux vert, et du sulfate uranique

Une rainure latérale pratiquée au niveau du fond de la boîte permettait de glisser sous la feuille de papier noir une plaque photographique fixée sur une lame de plomb puis le tout était enfermé dans une seconde boîte de plomb. Le changement de plaque se faisait sans toucher aux échantillons, en restant dans l'obscurité absolue, et en sortant la première boîte de la deuxième. Les sels ne pouvaient recevoir l'influence d'aucun agent actif sans que celui-ci eût traversé plusieurs millimètres de plomb. Des épreuves ont été obtenues d'abord régulièrement toutes les quarante-huit heures; puis à des époques de plus en plus espacées ; la dernière épreuve a été obtenue le 30 mars 1903. On a reproduit (Pl. I, fig. 3 et 4) la première et la dernière épreuve, faites à sept ans d'intervalle dans les mêmes conditions, sans que les matières actives aient été retirées de la boîte de plomb, et sans que, pendant tout cet intervalle de temps, celle-ci soit sortie du local obscur où elle était enfermée. Toutes les épreuves montrent qualitativement la quasi-permanence du phénomène.

Au début de ces recherches, plusieurs expériences,

faites le 7 mars 1896, touchèrent à de nombreux points importants. On réalisa la radiographie d'une médaille en aluminium. [L'épreuve de cette médaille, reproduite Pl. I, fig. 2 a été obtenue avec une pose de quatre jours, du 16 au 20 mars 1896, sous des lamelles de sulfate double d'uranium et de potassium.] On observa qu'une lamelle recouverte par un miroir d'acier donne une impression plus intense qu'une lamelle non recouverte, impression qui s'étend sous le miroir. Ce phénomène attribué d'abord à une réflexion est un phénomène secondaire sur lequel on reviendra dans un autre chapitre.

On reconnut que l'action s'affaiblit avec la distance des lamelles à la surface de la plaque photographique, montrant ainsi une absorption et une diffusion par l'air; diverses lamelles de sulfate double d'uranyle et de potassium ont été disposées sur une plaque Lumière (non enveloppée) placée au fond d'une boîte de carton, et à des distances de $0^{mm},0$, $0^{mm},2$, 1 millimètre et 3 millimètres. Une plaque toute semblable a été disposée en même temps sous une cloche où l'air était raréfié à quelques centimètres de pression. Les deux plaques développées au bout de vingt-trois heures de pose n'ont pas présenté de différence sensible entre l'impression obtenue dans l'air ou sous la cloche de la machine pneumatique; les impressions produites par les diverses lamelles depuis celles qui étaient au contact de la plaque jusqu'à celles qui étaient distantes de 1 millimètre ont été à peu près identiques, tandis que la silhouette de la lamelle distante de 3 millimètres de la gélatine a été beaucoup plus faible que les autres dans les deux épreuves.

On avait, en outre, disposé une expérience dont les résultats remarquables n'ont pu être reproduits une seconde fois et qui sera décrite dans le chapitre suivant.

Enfin le même jour, 7 mars 1896, j'observai l'un des phénomènes les plus importants, celui qui a constitué la méthode la plus employée dans ces études, le seul qui jusqu'ici ait fourni des indications numériques, la décharge des corps électrisés sous l'action du rayonnement nouveau. J'ai démontré plus tard que cette décharge se faisait par l'intermédiaire des gaz ambiants rendus conducteurs, de sorte que l'on observe, en réalité, un effet produit sur le gaz, et les corps électrisés interviennent seulement par le champ électrique qu'ils produisent. Cette étude sera développée au chapitre III. On s'est borné à citer ici, d'abord les premières mesures numériques obtenues, puis quelques résultats relatifs aux nouveaux rayons observés au moyen de la méthode électrique.

Le premier appareil qui ait servi à ces observations est un électroscope à feuilles d'or, dont la cage est une lanterne rectangulaire en fer munie de verres conducteurs de l'électricité, et dont la tige est isolée par un bouchon de diélectrine (mélange de soufre et de paraffine, préparé par M. Hurmuzescu) (fig. 1). L'isolement était presque parfait; les feuilles d'or, divergeant d'une vingtaine de degrés se rapprochaient de 2°,5 en douze heures vingt-cinq minutes. En introduisant dans la cage une lamelle de sulfate double d'uranyle et de potassium, l'électroscope se déchargea en une heure et demie environ.

Le lendemain 8 mars, après avoir disposé un rapporteur contre l'une des faces de la lanterne de l'électroscope, et

une lunette permettant de voir à la fois les feuilles d'or et les divisions du rapporteur, on fit les observations indiquées dans le tableau suivant. Les feuilles d'or de l'appareil, quand celui-ci est électrisé, divergent d'un angle α. Cet angle diminue quand la charge se dissipe, et la rapidité de cette diminution, le rapport $\frac{d\alpha}{dt}$, a permis de comparer numériquement, non pas l'intensité absolue du rayonnement, mais certains effets liés à cette intensité.

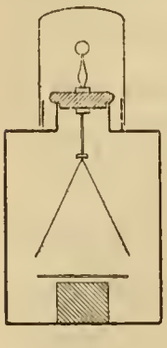


Fig. 1.

L'angle α est une fonction du potentiel des feuilles d'or. Dans ces premières expériences, l'influence s'exerçait sur des conducteurs dont les positions étaient variables par rapport aux corps actifs; on ne peut donc déduire des nombres observés que des résultats comparatifs quand les conditions sont identiques. On verra néanmoins que les premières conclusions déduites sont conformes à celles qui ont été observées plus tard avec une disposition meilleure et par des mesures plus rigoureuses.

Les valeurs de $\frac{d\alpha}{dt}$ correspondent à des degrés par minute de temps, ou à des minutes d'angle par seconde de temps. Ces premières mesures, bien que très imparfaites, montrent cependant qu'il n'y a pas de différence notable entre la déperdition de l'électricité négative et celle de l'électricité positive, contrairement à ce que l'on observe avec les rayons ultra-violets.

En faisant varier la distance de la source radiante aux feuilles d'or l'effet observé est sensiblement le même, ce

TABLEAU I

VITESSE DU RAPPROCHEMENT DES FEUILLES D'OR DE L'ÉLECTROSCOPE
SULFATE URANICO-POTASSIQUE

(Surface, 10 centimètres carrés).

ÉLECTRICITÉ NÉGATIVE.												ÉLECTRICITÉ POSITIVE.		
1re SÉRIE. Distance au-dessous des feuilles d'or $d = 1^c$.			2e SÉRIE. Distance au-dessous des feuilles d'or $d = 2^c$.			3e SÉRIE : $d = 1^c$. Interposition d'une lame d'aluminium de 2^{mm}.			4e SÉRIE. Distance au-dessous des feuilles d'or $d = 2^c$.			5e SÉRIE : $d = 1^c$.		
Heures.	α	$\frac{d\alpha}{dt}$	Heures.	α	$\frac{d\alpha}{dt}$	Heures.	α	$\frac{d\alpha}{dt}$	Heures.	α	$\frac{d\alpha}{dt}$	Heures.	α	$\frac{d\alpha}{dt}$
3^h17^m	17°3	»	4^h10^m	12°1	»	4^h35^m	12°3	»	5^h57^m	17°6	»	6^h34^m	11°0	0,55
26	14°3	0,33	21	5°8	0,57	48,5	11°6	0,051	6 3	15°3	0,38	38	9°4	
36	9°9	0,44	26,5	2°6	0,58	5 13	10°0	0,065	6 21	5°1	0,57	45	5°0	
45	5°8	0,45	»	»	»	37	8°1	0,079	6 28	1°8	0,47	46	4°8	0,68
»	»	»	»	»	»	52	5°8	0,153	»	»	»	48,5	2°6	

qui montre une influence de la masse totale d'air traversée par ces rayons, influence qui ne fut nettement mise en évidence que plus tard. Une lame d'aluminium épaisse de 2 millimètres, qui occupait une surface de ($8^c \times 3^c,8$), a réduit le rayonnement à 0,14 environ de sa valeur; on trouvera plus loin le nombre plus précis 0,16.

Cependant pour montrer que, tout imparfaite qu'elle était, cette première disposition donnait des résultats comparables, on citera une série d'expériences faites quelques jours plus tard en recouvrant la lamelle de sulfate double d'uranyle et de potassium avec diverses lames métalliques minces. Ces lames absorbaient le rayonnement qui atteignait directement les feuilles d'or, mais n'interceptaient pas le rayonnement latéral sur l'air ambiant; on verra plus

loin que toute la masse d'air rendue conductrice par ces rayons intervient dans la décharge, de sorte que l'effet des divers écrans devait être à peu près le même, ainsi que l'a montré l'expérience. Il a fallu réaliser une autre disposition pour mesurer l'absorption produite par ces diverses lames.

TABLEAU II

28 MARS 1896.

SEL D'URANIUM PLACÉ A L'INTÉRIEUR DE LA CAGE DE L'ÉLECTROSCOPE A FEUILLES D'OR.

1re Série. Sel non recouvert.			2e Série. Lame d'aluminium *épaisseur* = 0mm,10			3e Série. Lame de cuivre *épaisseur* = 0mm,09			4e Série. Lame de platine *épaisseur* = 0mm,035		
t	α	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	α	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	α	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	α	$\frac{d\alpha}{dt}$
h. m.	degr.		h. m.	deg.		h. m.	deg.		h. m.	degr.	
1 44	10,3	»	2 04	13,9	»	3 22	16,5	»	4 18	19,0	»
54	4,5	0,58	30	10,5	0,13	42	13,0	0,17	33	16,6	0,16
»	»	»	52,5	6,7	0,17	4 15	6,5	0,20	42	15,2	0,15
»	»	»	3 12	3,7	0,15	»	»	»	59	12,6	0,15
»	»	»	»	»	»	»	»	»	5 11	10,6	0,17

5e Série. Lames de platine et d'aluminium.			6e Série. Sel non recouvert.			7e Série. Lames d'aluminium et de cuivre.			8e Série (29 mars). Sel non recouvert.		
h. m.	degr.		h. m.	deg.		h. m.	deg.		h. m.	degr.	
5 30	18,3	»	6 12	13,8	»	6 33	13,2	»	5 03	30,0	»
50	16,1	0,11	14,2	12,6	0,54	48	12,0	0,10	06,5	28,5	0,43
6	15,0	0,11	25	6,8	0,54	52	11,15	0,12	12	25,8	0,50
6 10	14,0	0,10	»	»	»	»	»	»	36	13,5	0,51
»	»	»	»	»	»	»	»	»	59	0,5	0,56

Ce tableau est donné à titre d'exemple des premières mesures. Un peu plus tard l'expérience fut disposée dans de meilleures conditions en agissant sur la boule de l'électroscope.

On voit que ces expériences conduisent à deux méthodes pour étudier les nouveaux rayons : la méthode photographique qui donne des résultats qualitatifs, et la méthode électrique qui peut fournir des valeurs numériques de comparaison.

Je m'attachai d'abord à rechercher l'existence ou la non-existence d'une cause excitatrice du rayonnement nouveau.

Dans quelques cas l'impression photographique produite par des échantillons d'un sel exposé à la lumière ou vivement éclairé par des étincelles électriques a paru être plus intense que l'impression produite par le même corps soigneusement maintenu à l'abri de toute excitation. On a reproduit Pl. II, fig. 10, une épreuve qui montre ce phénomène.

Mais il semble que ces faits soient accidentels, car des mesures électriques et les expériences faites en vue d'analyser les rayons actifs n'ont permis de constater aucune action de ce genre. Voici, par exemple, une des premières mesures faites pour rechercher cet effet.

SULFATE DOUBLE D'URANYLE ET DE POTASSIUM DANS L'ÉLECTROSCOPE A 1c AU-DESSOUS DES FEUILLES D'OR (14 mars 1896)

SEL A L'ABRI DE L'EXCITATION			SEL EXCITÉ PAR LA LUMIÈRE DU MAGNÉSIUM.		
t	α	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	α	$\frac{d\alpha}{dt}$
4^h38^m	15°,8	»	5^h12^m	19°,6	»
5^h07^m	5°,8	0,34	5^h39^m	10°,0	0,35

J'avais reconnu assez vite que le phénomène, même s'il eût été de la même nature que la phosphorescence, n'était pas lié à la phosphorescence visible, car tous les

sels d'uranium avec lesquels l'expérience avait été faite s'étaient montrés actifs, qu'ils fussent phosphorescents comme les sels d'uranyle, ou qu'ils ne le fussent pas comme les sels uraneux. Le sulfate uranique qui est fluorescent et le sulfate uraneux qui ne l'est pas, émettent l'un et l'autre des radiations invisibles presque aussi intenses, ainsi qu'on peut le voir dans la Pl. I, fig. 3 et 4.

On a encore fait dans le même ordre d'idés les expériences suivantes :

On sait que le nitrate d'uranyle cesse d'être phosphorescent ou fluorescent lorsqu'il est en dissolution, ou fondu dans son eau de cristallisation. Un cristal de ce sel, disposé dans un petit tube fermé par une plaque mince de verre, fut chauffé à l'obscurité de manière à éviter l'effet de toute radiation, même de la part de la lampe à alcool qui servait à élever la température; le sel, une fois fondu, a cristallisé de nouveau à l'obscurité, et fut placé ensuite sur une plaque photographique enveloppée de papier noir, en préservant toujours le sel de l'action de la lumière. Si l'on eût eu affaire à un phénomène de phosphorescence, comme toute excitation lumineuse avait été évitée depuis le moment où le sel avait cessé d'être phosphorescent, on eût dû n'observer aucun rayonnement. Or, l'impression a été aussi forte que celle des échantillons mis en expérience comparative sur la même plaque.

Sur cette même plaque se trouvaient encore des cristaux de nitrate d'uranyle reposant sur des lamelles de verre par des faces différentes et pour lesquels les effets ont été sensiblement les mêmes.

On a recherché encore si l'effet excitateur dont on avait

cru d'abord discerner quelques traces provenait d'une région particulière du spectre. A cet effet on disposa des surfaces unies formées de sulfate uranique et de sulfate double uranico-potassique; sur ces surfaces on projeta soit le spectre solaire, soit le spectre de l'arc électrique au travers d'un appareil en quartz. Les bandes d'excitation ultra-violettes se sont alors très nettement dessinées par fluorescence. Ces surfaces, après avoir subi cette excitation; furent appliquées sur des plaques photographiques, et l'impression obtenue fut uniformément noire, ne manifestant aucune différence entre les rayons émis par les régions qui étaient devenues fluorescentes, et celles qui n'avaient pas été excitées par la lumière. S'il existe des rayons excitateurs du rayonnement, ceux-ci ne sont ni des rayons lumineux, ni des rayons ultra-violets compris dans les régions projetées sur les sels d'uranium.

Une lamelle de sulfate double uranico-potassique exposée au rayonnement d'un tube de Crookes et une lamelle non exposée ne manifestèrent aucune différence appréciable dans leur activité.

J'ai également recherché (1) si le rayonnement uranique communiquerait une activité à divers autres corps ; mais je n'ai obtenu que des résultats négatifs. Le phénomène cherché se produit dans des conditions qui ont été découvertes en 1899 par M. Curie et par M. Rutherford.

On n'énumérera pas ici toutes les expériences réalisées pour reconnaître si diverses substances se laissent plus ou moins facilement traverser par les rayons de l'uranium.

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXII, p. 766, 30 mars 1896.

On donne seulement (Pl. III, fig. 11) la reproduction d'un épreuve obtenue en plaçant divers petits écrans sous des lames de sulfate double d'uranium et de potassium.

J'avais encore essayé, le 31 mars 1896, de reconnaître si un solide isolant, tel que la paraffine, placé entre un conducteur chargé et un électroscope à décharges, devient conducteur sous l'influence des nouveaux rayons. L'expérience n'a rien donné avec l'uranium, mais j'ai observé plus tard le phénomène avec des corps plus actifs.

J'insisterai davantage sur des particularités et sur des anomalies qui m'ont longtemps induit en erreur au sujet de la nature des rayons nouveaux. Les bords de tous les écrans minces placés sur des plaques photographiques et traversés obliquement par le rayonnement sont entourés d'une ombre portée. On verra plus loin de très curieux effets de ce phénomène qui est général. La première idée qui venait naturellement à l'esprit était d'attribuer cet effet à une réflexion totale consécutive d'une réfraction, et l'on pouvait être confirmé dans cette idée par les épreuves obtenues en couvrant les sels actifs avec un miroir métallique, par certaines impressions obtenues près des arêtes de prismes, et surtout par la belle épreuve obtenue avec le sulfure de calcium (Pl. II, fig. 5) dont il sera question dans le chapitre suivant, épreuve qui semble bien attribuable à des rayons ayant la même nature que la lumière.

On devait alors rechercher si une combinaison de cristaux biréfringents absorbants ne manifesterait pas des phénomènes de polychroïsme montrant à la fois la polarisation et le caractère de transversalité d'un mouvement constituant ces rayons.

Dans ce but on forma un écran avec deux morceaux d'une même lame de tourmaline ; ces morceaux croisés l'un à côté de l'autre reposaient sur une lame unique d'une autre tourmaline, et cette combinaison optique laissait passer deux faisceaux lumineux inégalement intenses. Sur ce système on plaça une lamelle de sulfate double uranico-potassique, et le tout fut posé sur une plaque photographique enveloppée de papier noir. La plaque développée au bout de soixante heures a montré la silhouette des tourmalines, et l'impression au travers des tourmalines dont les axes était parallèles, était plus forte qu'au travers des tourmalines croisées.

Une seconde épreuve faite avec les premières tourmalines donna un résultat dans le même sens que le premier ; cette épreuve est reproduite Pl. II, fig. 6, mais l'effet est sans doute dû à un accident, car toutes les épreuves faites depuis, soit avec les mêmes tourmalines soit avec un grand nombre d'autres, ont donné des résultats négatifs et les deux faisceaux transmis furent également intenses. La figure suivante (Pl. II, fig. 8) reproduit une épreuve obtenue avec le même dispositif, du 24 juillet au 7 nov. 1896.

Je n'aurais donc pas énoncé un résultat erroné relatif à la nature des rayons uraniques, sans le concours de circonstances et d'anomalies dont je viens de parler; l'un de ces phénomènes anormaux paraît assez important pour faire l'objet d'une discussion particulière dans le chapitre II.

Les rayons de l'uranium ne se réfléchissent pas et ne se réfractent pas comme la lumière.

Un grand nombre d'expériences faites en disposant au-dessus des sources radiantes des miroirs métalliques concaves donnant sur les plaques photographiques des images de ces sources n'ont jamais reproduit ces images; elles ont seulement donné des impressions diffuses, avec des maxima d'intensité dans le voisinage des parois des miroirs qui étaient les plus voisins des plaques. On verra plus loin que les rayons qui proviennent du miroir sont dus à un rayonnement secondaire très absorbable par l'air. Des expériences faites le 22 mars 1896, par la méthode électrique, avaient montré que le rayonnement d'une lamelle de sulfate double intercepté dans son trajet rectiligne par un écran de platine épais, mais projeté par un miroir sur la boule d'un électroscope, ne produit sur celui-ci aucun effet appréciable de décharge.

Enfin il est une expérience fondamentale, qui en l'absence des anomalies que je viens de signaler eût dû entraîner de suite la conviction (1). Entre deux lames de verre de même épaisseur, on tassa de la poudre de verre obtenue en pulvérisant un fragment du même verre. Dans ces conditions la bande de verre pulvérisé apparaît comme opaque à la lumière ordinaire. Or, on sait que le rayonnement émis par un tube de Crookes traverse la poudre de verre avec la même facilité qu'une lame de verre homogène; c'est là une des expériences fondamentales de M. Röntgen. Dans les conditions qui viennent d'être indiquées la bande de verre pulvérisé s'est comportée comme notablement

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXII, p. 766, 30 mars 1896.

plus transparente pour les radiations uraniques que les lames de verre voisines. La quantité de matière traversée étant moindre dans la matière pulvérisée, on doit en conclure que la transmission a eu lieu sans réflexion ni réfraction totale analogue à celles de la lumière. La figure 9 de la Pl. II reproduit l'une de ces expériences.

Comme on l'a vu plus haut, tous les sels d'uranium étudiés au point de vue de l'émission des nouveaux rayons, que ces sels soient fluorescents comme les sels uraniques, ou qu'ils ne le soient pas comme les sels uraneux, ont manifesté des propriétés radiantes à peu près également intenses, permanentes et insensibles à toute excitation extérieure. Parmi les divers corps avec lesquels j'avais expérimenté, les corps contenant de l'uranium avaient seuls montré cette émission. J'ai donc été conduit à penser que l'activité radiante n'était pas, comme la phosphorescence, liée à un état particulier, physique ou chimique de la substance, mais que l'effet était dû à l'élément uranium (1), et que l'activité était une propriété moléculaire caractéristique de l'atome de cet élément. L'uranium métallique devait alors être le plus actif des corps étudiés.

Une petite quantité d'uranium en poudre que je possédais depuis longtemps dans mon laboratoire manifesta une action énergique; puis M. Moissan ayant eu l'obligeance de me donner quelques échantillons d'uranium métallique presque pur, j'ai pu faire de nombreuses expériences soit par la méthode électrique, soit par la méthode photogra-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXII, p. 1087, 18 mai 1896.

TABLEAU III

URANIUM MÉTALLIQUE ET SULFATE DOUBLE URANICO-POTASSIQUE
SURFACES ÉGALES (SURFACE 35 CENTIMÈTRES CARRÉS)

ANGLE DES FEUILLES D'OR.	19 MAI 1896.				20 MAI 1896							
	1 Uranium.		2 Sulfate.		3 Uranium.		4 Uranium.		5 Uranium.		6 Sulfate.	
	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$
degrés.	m. s.		m. s.		m. s.		m. s.		m. s.		m. s.	
24	»	»	»	»	»	»	»	»	0	»	»	»
23	»	»	»	»	»	»	»	»	15	4,0	»	»
22	0	»	»	»	»	»	0	»	27	5,0	»	»
21	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	0	»
20	25	4,50	»	»	0	»	25	4,50	52	4,08	47	1,27
18	»	»	»	»	»	»	45	6,00	1 7	8,00	2 13	1,39
17	»	»	»	»	30	6,00	»	»	»	»	»	»
16	1	6,85	0	»	»	»	1	8,00	1 25	6,66	3 34	1,49
15	»	»	»	»	45	8,00	»	»	»	»	»	»
14	»	»	»	»	»	»	1 17	7,06	1 41	7,50	4 40	1,82
13	»	»	2 0	1,08	»	»	»	»	»	»	»	»
12	1 35	6,56	2 30	2,00	1 08	7,83	1 48	7,74	1 56	8,00	5 45	1,84
10	1 50	8,00	3 25	2,08	1 22	8,50	»	»	2 11	8,00	»	»
8	»	»	»	»	1 37	8,00	»	»	»	»	7 39	2,10
6	2 17	8,88	»	»	»	»	2 12	10,00	2 38	8,88	8 21	2,85
5	»	»	5 25	2.50	»	»	»	»	»	»	»	»
4	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	9 15	2,22
3	»	»	6 10	2,66	»	»	»	»	»	»	»	»
2	2 45	8,57	6 35	2,40	2 14	9,73	2 40	8,57	3 03	9,60	10 10	2,18
1	»	»	7 0	2,40	»	»	»	»	»	»	10 54	1.36
0	»	»	»	»	2 30	7,50	2 55	8,00	3 24	5,00	»	»

phique. On trouvera à la fin de ce chapitre une série de mesures relatives à la comparaison du rayonnement de l'uranium, et de celui du sulfate uranico-potassique. Le tableau III donne les dernières séries faites par la méthode précédemment employée, puis bientôt abandonnée, en plaçant les corps à l'intérieur de l'électroscope. Ils ont été

cités pour montrer que malgré l'imperfection de la méthode les résultats peuvent être comparés à ceux que donnent les dispositions meilleures employées dans la suite.

Les nombres de ce tableau mettent bien en évidence la défectuosité expérimentale. La vitesse de la décharge $\frac{d\alpha}{dt}$ est une fonction de l'écartement α des feuilles d'or; d'une part cet écartement n'est pas proportionnel au potentiel, et, d'autre part, suivant la valeur de l'angle α les feuilles d'or sont à des distances très variables de la surface rayonnante. Cependant en comparant les durées qui correspondent à des variations d'angles identiques, on trouve des nombres très comparables donnant des vitesses de déperdition en moyenne 3,66 fois plus grandes pour l'uranium que pour le sulfate double.

Pour éviter l'un des principaux inconvénients qui viennent d'être signalés l'expérience fut disposée de la manière suivante : au lieu de la disposition représentée plus haut (fig. 1), le couvercle fut remplacé par un tube ouvert, en fer ou en cuivre, sur lequel on plaçait la surface rayonnante; celle-ci agissait alors sur la boule de l'électroscope, ou, comme on le verra plus loin, sur l'air entourant ce conducteur (fig. 2). En faisant reposer les surfaces actives sur des plaques métalliques épaisses percées d'une ouverture on réalisait des surfaces radiantes rigoureusement égales, et à des distances constantes de la boule électrisée de l'électroscope.

Dans une première série, le 20 mai 1896, le rayonnement traversait une ouverture rectangulaire de ($2^c,6 \times 2^c,2$) pratiquée dans une mince lame de cuivre, et la surface active

était à $21^{mm},5$ de la boule de l'électroscope. La comparaison des vitesses $\frac{d\alpha}{dt}$ a donné, pour le rapport de l'action de l'uranium et du sulfate à surface égale, le nombre 3,67, presque identique au précédent.

Pour bien montrer le perfectionnement qui correspond à cette seconde disposition, je rapporterai quelques séries faites avec un disque de fonte d'uranium contenant quelques centièmes de carbone et mesurant 67 millimètres de diamètre sur 5 millimètres environ d'épaisseur moyenne. Ce disque était soutenu par un tube en ferblanc de 65 millimètres de diamètre et de 95 millimètres de hauteur; la surface était à $21^{mm},5$ de la boule qui avait $15^{mm},80$ de diamètre. Ces séries avaient pour but d'établir définitivement si une excitation par la lumière du soleil se traduisait par une variation dans l'intensité de l'émission.

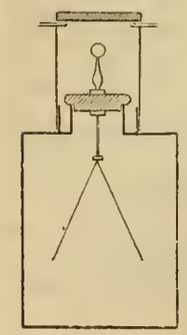


Fig. 2.

Les nombres du tableau suivant (tableau IV) montrent que cette influence est inappréciable. Ce tableau fait encore voir que, dans ces nouvelles conditions, la vitesse du rapprochement des feuilles d'or, $\frac{d\alpha}{dt}$, est à peu près indépendante de la valeur de l'angle α, et sensiblement constante, sauf pour les faibles valeurs de α.

Diverses autres séries, faites en plaçant le disque d'uranium à différentes distances de la boule de l'électroscope, et dont on ne donne pas le détail, ont conduit à des conclusions identiques.

Les tableaux suivants sont relatifs à la comparaison des

effets produits par l'uranium métallique et par le sulfate double uranico-potassique, à surfaces égales.

TABLEAU IV

(21 MAI 1896). — DISQUE D'URANIUM

Angles des feuilles d'or.	1. LUMIÈRE FAIBLE.		2. LUMIÈRE FAIBLE.		3. APRÈS INSOLATION PENDANT 25m.		4. LUMIÈRE FAIBLE DIX MINUTES APRÈS LA SÉRIE 3.		5. APRÈS INSOLATION PENDANT 1m.		6. APRÈS INSOLATION PENDANT 36m.	
α	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$
o	m. sec.		m. sec.		m. sec.		m. sec.		m. sec.		m. sec.	
26	»	»	»	»	0	»	»	»	»	»	»	»
24	»	»	»	»	17	7,06	»	»	»	»	»	»
22	»	»	0	»	37	6,00	»	»	0	»	0	»
20	»	»	20	6,00	56	6,31	0	»	19	6,31	17.5	6,85
18	»	»	40	6,00	1 15	6,31	19	6,31	35	7,50	37,5	6,00
16	0	»	58	6,66	1 35	6,00	37	6,60	55	6,00	57	6,15
14	20	6,00	1 18	6,00	1 55	6,00	57	6,00	1 15	6,00	1 17	6,00
12	40	6,00	1 38	6,00	2 15	6,00	1 15	6,60	1 35	6,00	1 37,5	6,00
10	1 00	6,00	1 58	6,00	2 35	6,00	1 37	5,45	1 55	6,00	1 57	6,00
8	1 22	5,45	2 18	6,00	2 56	5,71	1 59	5,45	2 14	6,31	2 16	6,31
6	1 43	5,71	2 40	5,45	3 18	5,45	2 16	7,06	2 34	6,00	2 37	5,71
4	2 5	5,45	3 00	6,00	3 36	6,60	2 36	6,00	2 55	5,71	2 57,5	6,15
2	2 30	4,80	3 25	4,80	4 00	5,00	3 00	5,00	3 17	5,45	3 20	5,33
1	2 50	3,00	3 55	2,00	4 17	3,53	3 16	3,75	3 33	3,75	3 36	4,28

Les feuilles d'or chargées et abandonnées à elles-mêmes se sont rapprochées de 13° en 19 heures 30 min.

$$\frac{d\alpha}{dt} = 0,011.$$

Lorsqu'il n'est pas fait spécialement mention de la surface, la totalité de la section du tube était utilisée. Le disque d'uranium était posé sur la partie supérieure ouverte du tube, et les lamelles de sulfate étaient maintenues par quelques fils tendus très fins formant de très larges mailles.

TABLEAU V

α	OUVERTURE CIRCULAIRE DE 37mm DE DIAMÈTRE. DANS UNE PLAQUE DE CUIVRE MINCE. 29 MAI 1896. 1 Uranium.		2 Sulfate.		DANS UNE PLAQUE DE PLOMB. 30 MAI 1896. 3 Uranium.		4 Sulfate.		5 Uranium.		OUVERTURE CIRCULAIRE DE DE 55mm DIAMÈTRE DANS UNE LAME DE PLOMB. 30 MAI 1896. 6 Sulfate.		7 Uranium.	
	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$
	m. s.		m. s.		m. s.		m. s.		m. s.		m. s.		m. s.	
20	»	»	»	»	0	»	0	»	0	»	0	»	0	»
19	0	»	0	»	23	2,61	1 14	0,81	23	2,61	45	1,33	11	5,45
18	24	2,50	1 24	0,702	50	2,22	2 16	0,96	52	2,07	1 27	1,43	23	5,00
17	47	2,61	3 00	0,625	1 14	2,50	3 48	0,65	1 17	2,40	2 11	1,36	38	4,00
16	1 7	3,00	4 18	0,769	1 41	2,22	5 12	0,71	1 40	2,61	3 00	1,22	49	5,45
15	1 30	2,61	5 57	0,606	2 8	2,22	6 36	0,71	2 5	2,40	»	»	1 01	5,00
14	1 57	2,22	7 17	0,750	2 34	2,31	8 5	0,67	2 35	2,00	»	»	1 13	5,00
13	2 16	3,15	8 45	0,681	2 58	2,50	9 37	0,65	»	»	»	»	1 25	5,00
12	2 43	2,22	10 00	0,800	3 24	2,30	11 2	0,70	»	»	»	»	1 40	4,00
11	3 2	3,15	»	»	3 50	2,30	12 19	0,78	»	»	»	»	1 51	5,45
10	3 27	2,40	»	»	4 16	2,30	13 50	0,66	»	»	»	»	2 2	5,45
9	3 50	2,61	»	»	4 44	2,14	»	»	»	»	»	»	»	»
8	4 16	2,31	»	»	5 6	2,72	»	»	»	»	»	»	»	»
7	4 59	2,89	»	»	5 33	2,07	»	»	»	»	»	»	»	»
6	»	»	»	»	6 3	2,14	»	»	»	»	»	»	»	»
5	»	»	»	»	6 29	2,31	»	»	»	»	»	»	»	»
4	»	»	»	»	7 0	1,93	»	»	»	»	»	»	»	»

TABLEAU VI

	28 MAI 1896.								30 MAI 1896.							
	URANIUM						SULFATE DOUBLE.		SULFATE DOUBLE				URANIUM			
	1 Sans écran.		2 Écran d'aluminium.		3 Écran de cuivre.		4 Écran d'aluminium.		5 Sans écran.		6 Écran d'aluminium.		7 Sans écran.		8 Écran d'aluminium.	
	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	t	$\frac{d\alpha}{dt}$
	m. s.		m. s.		m. s.		m. s.		m. s.		m. s.		m. s.		m. s.	
20	0	»	»	»	»	»	»	»	0	»	0	»	0	»	0	»
19	»	»	0	»	0	»	0	»	34	1,76	3 50	0,26	»	»	1 21	0,74
18	18	6,66	1 30	0,66	2 12	0,45	3 35	0,28	1 07	1.82	7 15	0,29	»	»	3 00	0,60
17	»	»	3 05	0,63	4 35	0,42	7 25	0,26	1 45	1,58	11 3	0,26	27	6,66	4 45	0,57
16	36	6,66	4 40	0,63	»	»	10 50	0,29	2 20	1,71	14 27	0,29	»	»	6 04	0,76
15	»	»	6 20	0,60	9 00	0,44	14 30	0,27	2 58	1,56	»	»	48	5,71	7 43	0.60
14	57	5,71	7 54	0,64	»	»	18 20	0,26	3 34	1,66	»	»	»	«	»	»
13	»	»	9 30	0,62	»	»	21 30	0,32	4 07	1,82	»	»	»	»	»	»
12	1 16	6,31	11 07	0,61	»	»	»	»	4 46	1,54	»	»	1 17	6,20	»	»
11	»	»	»	»	»	»	»	»	5 18	1,87	»	»	»	»	»	»
10	1 36	6,00	14 28	0,60	»	»	»	»	5 59	1,46	»	»	1 35	6,66	»	»
9	»	»	»	»	»	»	»	»	6 32	1,82	»	»	»	»	»	»
8	1 57	5,71	»	»	»	»	»	»	7 07	1,71	»	»	1 55	6,00	»	»
7	»	»	»	»	»	»	»	»	7 44	1,62	»	»	»	»	»	»
6	2 17	6,00	»	»	»	»	»	»	8 20	1,66	»	»	2 14	6,31	»	»
5	»	»	»	»	»	»	»	»	9 01	1,46	»	»	»	»	»	»
4	2 38	5,71	»	»	»	»	»	»	9 41	1,50	»	»	2 34	5,45	»	»
3	»	»	»	»	»	»	»	»	10 20	1,54	»	»	»	»	»	»
2	3 03	4,80	»	»	»	»	»	»	11 09	1,22	»	»	2 58	5,45	»	»

TABLEAU VII

α	31 MAI 1896 — URANIUM MÉTALLIQUE. 1 Sans écran. t	$\frac{d\alpha}{dt}$	2 Papier noir. t	$\frac{d\alpha}{dt}$	3 Lame de cuivre. t	$\frac{d\alpha}{dt}$	10 NOV. 1896. 4 URANIUM — SÉRIE DE COMPARAISON. t	$\frac{d\alpha}{dt}$
	m. sec.		m. sec.		m. sec.		m. sec.	
20	0	»	0	»	0	»	0	»
19	»	»	1 20	0,75	»	»	»	»
18	20	6,00	2 52	0,65	»	»	20	6,00
17	»	»	4 10	0,77	6 56	0,43	30	6,00
16	38	6,66	5 45	0,63	9 12	0,44	40	6,00
15	»	»	7 11	0,69	11 46	0,39	50	6,00
14	59	5,71	8 45	0,64	14 15	0,40	60	6,00
13	»	»	10 10	0,70	16 27	0,45	1 10,5	5,71
12	1 19	6,00	11 37	0,69	18 46	0,43	1 20	6,31
11	»	»	12 58	0,74	21 00	0,44	»	»
10	1 39	6,00	14 21	0,72	23 11	0,45	1 40	6,00
9	»	»	»	»	»	»	1 52	5,00
8	1 58	6,31	»	»	»	»	2 02	6,00
7	»	»	»	»	»	»	2 13	5,45
6	2 18	6,00	»	»	»	»	»	»
4	2 39	5,71	»	»	»	»	2 45	5,62
2	3 00	5,71	»	»	»	»	3 09	5,00

TABLEAU VIII

α	4 JUIN 1896. SULFATE DOUBLE URANICO-POTASSIQUE. 5 Sans écran. t	$\frac{d\alpha}{dt}$	6 Sans écran. t	$\frac{d\alpha}{dt}$	7 Papier noir. t	$\frac{d\alpha}{dt}$	8 Lame de cuivre. t	$\frac{d\alpha}{dt}$
	m. sec.		m. sec.		m. sec.		m. sec.	
20	0	»	0	»	0	»	0	»
19	31	1,93	34	1,76	3 08	0,32	4 36	0,21
18	1 01	2,00	1 05	1,93	6 02	0,34	9 45	0,19
17	1 38	1,62	1 35	2,00	8 59	0,34	15 31	0,17
16	2 14	1,66	2 10	1,71	»	»	20 35	0,19
15	2 56	1,43	2 52	1,43	15 16	0,31	26 10	0,18
14	3 31	1,71	3 31	1,54	18 30	0,31	31 35	0,18
13	4 03	1,87	4 03	1,87	21 40	0,31	36 32	0,20
12	4 45	1,43	4 36	1,80	24 29	0,35	»	»
11	5 12	1,22	5 09	1,80	27 21	0,34	»	»
10	5 50	1,58	5 45	1,66	30 33	0,31	»	»
9	6 31	1,40	»	»	»	»	»	»
8	7 02	1,93	»	»	»	»	»	»
7	7 36	1,76	»	»	»	»	»	»
6	8 15	1,54	»	»	»	»	»	»
4	9 32	1,55	»	»	»	»	»	»
2	»	»	»	»	»	»	»	»

α	4 JUIN 1896. SULFATE DOUBLE URANICO-POTASSIQUE (AUTRE ÉCHANTILLON). Sans écran. t	$\frac{d\alpha}{dt}$	Au travers de l'aluminium. t	$\frac{d\alpha}{dt}$
	m. sec.		m. sec.	
20	0	»	0	»
19	25	2,40	4 12	0,24
18	54	2,07	7 49	0,27
17	1 23	2,07	»	»
16	1 51	2,14	14 15	0,31
15	2 22	1,93	»	»
14	2 54	1,87	»	»
13	3 20	2,31	»	»
12	3 50	2,00	»	»
11	4 21	1,93	»	»
10	4 49	2,14	»	»
6	6 59	1,84	»	»
4	7 59	2,00	»	»
2	9 05	1,82	»	»

RÉSUMÉ DES SÉRIES PRÉCÉDENTES

COMPARAISON DES EFFETS PRODUITS PAR DES SURFACES ÉGALES D'URANIUM ET DE SULFATE DOUBLE URANICO-POTASSIQUE

SÉRIES	RAPPORTS DES MOYENNES DES VALEURS DE $\frac{d\alpha}{dt}$ (1).	RAPPORTS INVERSES DES DURÉES TOTALES DE LA CHUTE DES FEUILLES D'OR (1).
Séries du tableau III.	3,66	»
Série du 20 mai	3,63	3,71
Tableau V. Séries 1-2..	3,70	3,68
— — 3-4-5	3,22	3,24
— — 6-7	3,72	3,67
— VI. Séries 5-7.	3,67	3,71
— VII. Séries différentes. . .	3,51	3,57

(1) L'action sulfate double étant prise pour unité.

INTENSITÉS AU TRAVERS DE DIVERS ÉCRANS

	SANS ÉCRAN.	PAPIER NOIR.		ALUMINIUM.		CUIVRE.	
	$\frac{d\alpha}{dt}$	$\frac{d\alpha}{dt}$	RAPPORT.	$\frac{d\alpha}{dt}$	RAPPORT.	$\frac{d\alpha}{dt}$	RAPPORT.
Uranium.	6,22	0,730	0,117	0,624	0,1003	0,437	0,0702
	6,07	0,698	0,115	»	»	0,429	0,0705
	6,19	»	»	0,654	0,105	»	»
Sulfate double uranico-potassique.	1,690	»	»	0,275	0,162	»	»
	1,747	0,325	0,186	»	»	0,188	0,1076

Le résumé des valeurs numériques obtenues montre que les moyennes de chaque série diffèrent peu de la moyenne déduite du tableau III avec l'ancienne disposition à l'intérieur de l'électroscope.

On avait trouvé le nombre 3,66 comme rapport de l'effet de l'uranium à celui du sulfate double.

La moyenne des diverses séries, en écartant l'une d'elles manifestement plus faible que les autres, conduit au même nombre 3,66. Les divergences entre les mesures montrent que dans ces expériences on ne peut répondre du second chiffre décimal. La colonne 4 du tableau VII contient le résultat de deux séries d'expériences faites quatre mois plus tard et qui font voir que les propriétés de l'uranium n'ont pas varié pendant ce temps.

Le tableau n° VIII est relatif à un échantillon de sulfate double uranico-potassique qui s'est comporté comme un peu plus fort (1,2) que le sulfate ancien ayant servi à toutes ces recherches. Cette différence paraît tenir à ce que la surface de ce dernier produit était parsemée de mamelons cristallins donnant une surface radiante un peu plus grande que celle de la projection plane de la surface utilisée.

Les écrans interposés dont on a mesuré l'absorption ont été : une feuille de papier noir, une lame d'aluminium de $0^{mm},10$ d'épaisseur, et une lame de cuivre ayant $0^{mm},09$ d'épaisseur. Les moyennes des rapports entre l'effet de la radiation au travers de l'écran et l'effet de la radiation non absorbée sont les suivants :

ÉCRANS.	URANIUM.	SULFATE DOUBLE.	RAPPORTS.
Papier noir..	0,116	0,186	1,60
Aluminium $0^{mm},10$ . .	0,102	0,162	1,59
Cuivre $0^{mm},09$.. . . .	0,070	0,107	1,53

On voit par ce résumé que, dans la radiation totale

émise par le sulfate double, la partie efficace pour décharger l'électroscope est proportionnellement moins absorbée que celle de l'uranium métallique.

Ce fait peut constituer une forte présomption, sinon une preuve de l'hétérogénéité du rayonnement; cette conclusion pouvait déjà être déduite des expériences imparfaites données dans le tableau II.

Enfin, comme contrôle de l'expérience rapportée dans le tableau II, on peut citer les nombres suivants empruntés à une expérience du 2 février 1897 avec le disque d'uranium en présence de l'électroscope chargé soit d'électricité positive soit d'électricité négative.

α	t	
	+	−
o	min. sec.	min. sec.
20	0	0
15	1 9	1 9
10	2 19	2 21
1	4 48	4 51

Ces nombres montrent que le rayonnement décharge avec la même vitesse les corps électrisés positivement et les corps électrisés négativement.

§ 2. — *Premières expériences relatives au rayonnement qu'émettent les corps frappés par le rayonnement de l'uranium.*

On a vu plus haut, pages 14 et 16, que lorsqu'un sel d'uranium ou l'uranium métallique est recouvert d'une petite cloche de verre, ou d'un miroir métallique, et posé

ainsi sur une plaque photographique, l'aire de la projection du contour de la cloche ou du miroir est impressionnée par des rayons qui paraissent issus de ceux-ci.

Ce phénomène avait été d'abord attribué à une réflexion diffuse; mais des expériences ultérieures, décrites au chapitre III, ont montré qu'il s'agissait d'un phénomène secondaire du même ordre que l'effet découvert à la même époque (juillet 1897) par M. Sagnac pour les rayons X.

Parmi les nombreuses expériences réalisées pour mettre en évidence ce phénomène, on citera seulement les suivantes, faites en janvier et février 1897 :

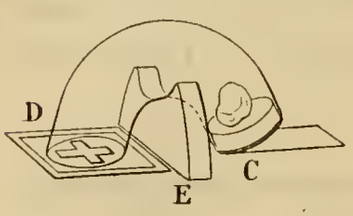


Fig. 3.

1° Sur la gélatine d'une plaque photographique non couverte de papier noir, on pose un tube de verre en forme d'U renversé (fig. 3). La branche C est fermée par un bouchon de liège, sur lequel pose un petit morceau d'uranium. La branche D est, soit ouverte, soit fermée par une mince lamelle de verre et repose sur une petite croix plate de cuivre découpée dans une lame mince. Entre les deux branches, en E, une lame épaisse de plomb empêche le rayonnement de l'uranium d'impressionner directement la région D. Au bout de quelques jours de pose à l'obscurité, on a développé la plaque et on a observé, en regard de l'orifice du tube D, une impression uniforme sur laquelle se détache en clair la petite croix de cuivre (Pl. III, fig. 13).

L'absence de papier noir ne permet pas ici d'exclure la possibilité d'un effet dû à une très faible phosphorescence du verre sous l'influence du rayonnement de l'ura-

nium; mais des effets analogues obtenus dans des conditions très variées au travers d'écrans opaques montrent la prépondérance de l'effet dû à des rayons secondaires.

2° Une boîte en carton de $50^{mm} \times 45^{mm}$, renversée, supporte au fond un miroir rectangulaire plan en acier poli, qui en occupe la moitié (fig. 4). La boîte est divisée perpendiculairement au miroir M, en deux moitiés par une lame de plomb R qui ne monte pas jusqu'au miroir; puis, parallèlement au long côté du miroir, du côté B, une plaque de plomb S montant jusqu'au fond divise encore la moitié B en deux compartiments égaux. On place ce système, dans sa position renversée, sur la gélatine d'une plaque photographique en posant sur celle-ci, au milieu de la moitié A, un morceau d'uranium, et dans la case B, au-dessous du miroir, une petite croix de cuivre destinée à servir de repère et d'écran. En développant l'épreuve au bout de quelques jours, on reconnaît que sous le miroir, dans la case B, où le rayonnement direct de l'uranium n'a pu atteindre la plaque, une impression intense a été produite par des rayons venant du miroir, disposé à une distance de 2 centimètres parallèlement à celle-ci (Pl. III, fig. 14). Dans cette expérience le phénomène de l'émission secondaire par le miroir de métal est nettement mis en évidence; de l'autre côté de S, le fond de carton a donné des rayons secondaires faibles.

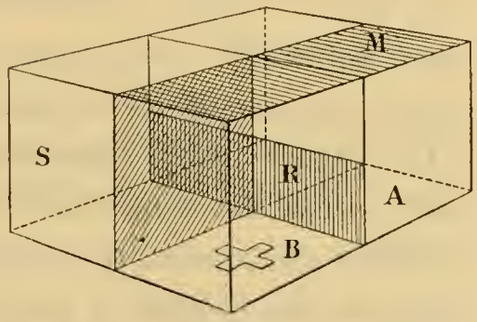


Fig. 4.

RÉSUMÉ

En résumé, il résulte de cette première partie des recherches présentes la constatation des faits nouveaux suivants :

L'uranium et tous les sels de ce métal émettent un rayonnement invisible et pénétrant qui produit des actions chimiques photographiques et décharge à distance les corps électrisés. Ce rayonnement paraît avoir une intensité constante, indépendante du temps, et n'être influencé par aucune cause excitatrice extérieure connue. Il paraît donc spontané. Il traverse les métaux, le papier noir et les corps opaques pour la lumière.

La plaque photographique et l'électroscope forment les bases de deux méthodes d'investigation pour étudier le nouveau rayonnement. La propriété radiante est liée à la présence de l'élément uranium ; c'est une propriété atomique indépendante de l'état moléculaire des composés.

Les corps frappés par le rayonnement nouveau émettent eux-mêmes un rayonnement secondaire qui impressionne une plaque photographique.

CHAPITRE II

PHÉNOMÈNES ANORMAUX PRÉSENTÉS PAR DIVERSES SUBSTANCES PHOSPHORESCENTES

Avant de continuer l'exposé des présentes recherches sur le rayonnement de l'uranium et des autres corps actifs, je crois devoir résumer dans ce chapitre diverses observations faites avec des corps phosphorescents. Les particularités de ces phénomènes, le caractère accidentel de leur manifestation, semblent montrer aujourd'hui que leur cause est tout autre que celle du rayonnement des corps actifs à la manière de l'uranium. Cependant cet exposé me paraît nécessaire, d'une part pour n'avoir plus à y revenir au cours de cette étude, et, d'autre part, pour signaler une expérience qui, malgré son caractère de fait d'exception, paraît néanmoins révéler un fait nouveau d'un ordre différent de celui qui nous occupe.

Cette constatation, au début de ces recherches et alors qu'il n'y avait aucune raison pour établir des différences dans la nature des rayons pénétrants observés, m'a profondément troublé, et m'a écarté pendant plusieurs mois de la voie où m'ont ramené ensuite les expériences.

L'observation faite par M. Niewenglowski avec la préparation lumineuse de sulfure de calcium du commerce, et rappelée plus haut, se rattachait si bien aux idées qui m'avaient fait entreprendre ce travail qu'il ne m'était pas venu à l'esprit de douter qu'elle ne se répétât facilement.

Les propriétés extraordinaires de l'uranium donnaient un nouvel intérêt à cette observation, et, dans le but d'en étudier les particularités, je disposai l'expérience suivante (1), dont la Pl. II, fig. 7, donne la reproduction photographique.

On fit avec de la toile noire, épaisse et opaque, une sorte de sac en forme d'enveloppe de lettre, dont une des faces était formée par une lame d'aluminium de 2 millimètres d'épaisseur, et de $9^c,4$ sur $7^c,8$ de surface. Dans cette enveloppe on introduisit une plaque photographique Lumière, 9×12, la gélatine tournée vers la plaque d'aluminium, et le tout fut placé horizontalement à la lumière diffuse, l'aluminium en dessus. (C'est, du reste, l'appareil décrit page 11.)

A l'extérieur de l'enveloppe, sur la plaque d'aluminium, on disposa divers corps phosphorescents : du sulfure de calcium, au bismuth, lumineux bleu foncé, et une autre préparation de même nature lumineuse bleu clair ou bleu verdâtre. Ces deux préparations, les plus belles que je connaisse parmi les préparations de sulfures phosphorescents, avaient été préparées il y a plus de vingt-cinq ans dans le laboratoire de physique du Muséum; elles étaient con-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXII, p. 563.

servées dans des tubes de verre fermés par des bouchons enduits de cire à cacheter. Divers échantillons avaient été maintes fois prélevés pour servir à diverses expériences de mon père ou aux miennes. A ces matières on avait joint une préparation de sulfure de calcium très lumineuse orangé, du sulfure de strontium donnant une belle phosphorescence verte, de la blende hexagonale phosphorescente préparée par M. Ch. Henry, et un fragment de fluorine (chlorophane) rendu vivement lumineux par des étincelles électriques.

Comme les sulfures de calcium et de strontium s'altèrent à l'air et cessent alors d'être phosphorescents, ces matières pulvérulentes avaient été enfermées, ainsi que la blende hexagonale, dans de petits tubes formant cloche, fermés à la lampe par une extrémité et reposant par leur partie ouverte sur de minces lamelles de verre de $0^{mm},2$ d'épaisseur, sur lesquels ils étaient scellés avec de la paraffine : une petite quantité de paraffine avait été coulée sur la tranche du tube de verre, et l'ensemble consolidé par un bourrelet de paraffine coulé à l'extérieur du tube, sur la plaque de verre. Ces préparations ont été disposées côte à côte sur la plaque d'aluminium après avoir été exposées à la lumière solaire, et le tout enfermé à l'obscurité dans une boîte, le 7 mars 1896, à 4 heures du soir.

La plaque photographique a été retirée et développée le 9 mars, à 9 heures du matin. Les sulfures de calcium à ce moment étaient encore lumineux dans la chambre noire.

L'épreuve photographique dont la reproduction est figurée (fig. 5, Pl. II) montra une impression étendue et

remarquablement intense produite par le sulfure bleu foncé. C'était une impression beaucoup plus intense que celles que j'obtenais alors avec les sels d'uranium pendant le même temps de pose. Le sulfure de calcium lumineux bleu clair avait donné une impression sensiblement limitée aux contours du tube qui le contenait; la position de la préparation de sulfure de strontium était à peine indiquée; quant aux autres corps, le sulfure de calcium orangé, la chlorophane et la blende hexagonale, ils n'avaient donné aucune impression.

Cette épreuve reproduisant le phénomène prévu par l'expérience de M. Niewenglowski ne me parut pas tout d'abord autrement extraordinaire; elle révélait des caractères remarquables que je vais indiquer, mais je ne prévoyais pas que je ne pourrais reproduire plus tard cette expérience; l'épreuve, après avoir été bien lavée, fut malheureusement séchée très vite à la flamme d'un foyer, et la gélatine fut partiellement fondue, ce qui explique certaines inégalités de la gélatine, qui apparaissent quand on regarde l'épreuve à la loupe.

L'impression obtenue présenta la particularité remarquable de reproduire avec une finesse très grande les bords de la lame en verre sur laquelle reposait le sulfure bleu foncé. Leur image est formée par un trait blanc qui représente une ombre portée; à l'intérieur, ce trait blanc est bordé par une ligne noire très fine, beaucoup plus noire que la région voisine. Comme la matière pulvérulente occupait dans le tube une hauteur de plusieurs millimètres, il était naturel de penser que la tache étendue était produite par des rayons émis au travers du tube,

ayant traversé obliquement la lame de verre. Si ces rayons se réfractaient et se réfléchissaient totalement sur la tranche verticale des bords, ils produiraient une impression identique à celle qui est réalisée sur la plaque, c'est-à-dire une ombre blanche avec un maximum noir étroit à l'intérieur.

La section du tube apparaît en clair sur le fond impressionné; elle est bordée à l'extérieur et à l'intérieur par une bande noire, très intense à l'intérieur de la projection du tube. Le contour de cette bande correspond à la limite de la poudre tassée et en partie agglomérée par la paraffine fondue qui a pu pénétrer à l'intérieur entre le tube et la lamelle de verre. Enfin le bourrelet extérieur de paraffine apparaît malgré la grande transparence que ce corps a présentée pour les rayons actifs, et la limite du bourrelet est encore une ligne fine blanche, sinueuse, bordée de noir à l'intérieur, offrant le même aspect que l'image des bords de la lame de verre.

L'impression produite par le sulfure de calcium bleu clair présente les mêmes caractères, mais avec une intensité beaucoup moindre. L'impression intense est à peu près limitée à la section intérieure du tube dont le contour est rendu irrégulier par la paraffine qui a pénétré par la tranche de la section inférieure. Le contour intérieur est limité par un bord très noir. Le contour extérieur de la section du tube de verre est entouré d'une faible bande noire, plus noire du côté exposé au rayonnement intense du tube voisin. Le bourrelet de paraffine apparaît très faiblement, limité également par une ligne sinueuse blanche à l'extérieur et noire à l'intérieur du contour, montrant que le

phénomène a été produit par une source radiante se projetant à l'intérieur du contour; enfin la plaque de verre apparaît légèrement en clair sur le fond de l'épreuve.

Du côté opposé à la source voisine beaucoup plus intense, le sulfure bleu foncé, les images des bords de la plaque de verre du sulfure bleu clair sont à peine indiqués; mais dans la région où ces bords sont rencontrés par le rayonnement du sulfure bleu foncé ils apparaissent avec des bords blancs à l'intérieur et noirs à l'extérieur, contrairement à ce qui se produit pour la lamelle de verre voisine, et pour les bords des bourrelets de paraffine. La position de la ligne blanche indique une ombre portée par la source la plus intense; pour l'un des bords de cette lamelle de verre, qui est à peu près dans l'axe du tube contenant le sulfure bleu foncé, il n'y a qu'une ligne noire, fine, l'ombre portée étant dans le prolongement de cette ligne. Le bord opposé à ce dernier présente, au contraire, une ombre portée blanche à l'extérieur, avec une ligne noire à l'intérieur, conformément à sa position, par rapport à la source radiante la plus intense.

Enfin le sulfure de strontium ne paraît pas avoir donné d'effet bien nettement attribuable à son rayonnement propre; la section du tube qui le contenait est très légèrement marquée à l'intérieur, l'effet pouvant être provoqué par l'action sur la paraffine de la source intense, le sulfure bleu foncé. Le bord de la lamelle de verre qui s'approche le plus du sulfure bleu foncé, et reçoit une partie intense de son rayonnement apparaît avec une ombre portée, blanche à l'intérieur, et une ligne noire du côté de la source active; la partie du bourrelet de paraffine

qui reçoit également ce rayonnement est limitée par une ligne noire à l'extérieur et blanche à l'intérieur, contrairement à ce que présentent les autres bourrelets, mais conformément à sa position par rapport à la source radiante intense. Enfin, deux autres bords de la lamelle montrent des ombres portées blanches à l'extérieur et l'une d'elles va en s'élargissant. Cette dernière particularité achève de démontrer que toutes ces lignes blanches sont des ombres portées provoquées par le rayonnement extraordinairement intense du sulfure de calcium bleu foncé.

Il ne semble pas y avoir de doute pour l'explication des lignes blanches; quant aux lignes noires elles sont dues à un rayonnement provoqué par les rayons incidents sur les parois verticales de la tranche des lamelles, ou sur les contours des bourrelets, rayonnement qui provoque sur place un maximum d'impression photographique. Une réflexion produirait le même effet à l'intérieur des lamelles ou des contours des corps transparents, et il était naturel de penser à un phénomène de réflexion totale; mais les effets identiques produits à la rencontre des parois verticales et du rayonnement à l'extérieur du milieu réfringent font penser, dans ce cas du moins, à un effet secondaire. On retrouvera du reste la plupart de ces faits, la ligne blanche et le bord noir, dans les impressions obtenues avec les rayons de l'uranium et des corps radioactifs, chaque fois que le rayonnement traverse le bord d'un écran transparent, papier, verre ou métal; cependant la netteté du phénomène est bien moindre, fig. 21, Pl. V.

La finesse des détails de l'épreuve qui vient d'être étudiée, finesse obtenue au travers d'une lame d'aluminium

épaisse de deux millimètres, est vraiment extraordinaire, et fait penser plutôt à des rayons lumineux qu'à des rayons qui, comme on le verra, se diffusent pour la plupart dans l'air au bout d'un très petit parcours. Cependant on verra aussi que ces nouveaux rayons provoquent des rayons secondaires, sur les corps qu'ils frappent, les uns à l'entrée au moment où ils sont absorbés, les autres, plus pénétrants, à leur sortie, phénomène qui rendrait compte de la bande noire qui entoure intérieurement et extérieurement les contours des sections des tubes de verre contenant les substances actives : on peut ainsi expliquer les ombres portées blanches, mais on ne voit pas la raison des lignes noires à l'intérieur des corps réfringents du côté de la source active, de sorte que, malgré les détails que donne l'épreuve ci-dessus, on ne peut encore en déduire aucune conclusion certaine sur la nature des rayons qui l'ont produite; ce qui est acquis, c'est que les rayons actifs ont traversé une plaque métallique d'aluminium de deux millimètres d'épaisseur.

Un des faits les plus inattendus est qu'après avoir aussi facilement obtenu l'épreuve qui vient d'être décrite, je n'ai jamais pu répéter cette expérience. Toutes les tentatives ont été infructueuses. Tout d'abord, le jour même où j'ai développé l'épreuve, frappé des indications importantes qu'elle donnait, j'ai remis aussitôt en expérience les mêmes substances dans les mêmes conditions, et j'ai été très surpris de n'obtenir aucune impression au bout du même temps de pose. Un nouvel échantillon de sulfure de calcium bleu foncé a été alors prélevé dans le tube où avait été pris le premier; cet échantillon a été disposé de même sur une

lamelle de verre et coiffé d'un bout de tube formant cloche : même insuccès; de même, pour le sulfure de calcium bleu clair. On a cherché alors si une excitation lumineuse ferait réapparaître l'activité ; on a eu recours aux rayons solaires, soit directs, soit dispersés par un prisme de quartz de façon à séparer les régions d'excitation et d'extinction; les sulfures ont été soumis aux étincelles électriques provenant de la décharge d'une batterie de bouteilles de Leyde, étincelles qui ont rendu les substances extrêmement lumineuses; ces corps ont été échauffés en présence de la plaque photographique sans que celle-ci s'échauffât, et en recueillant tout le rayonnement émis dans ces conditions. Les corps phosphorescents ont été refroidis en les excitant par ces divers moyens, de façon à accumuler une quantité d'énergie lumineuse, plus considérable, quantité restituée ensuite par le réchauffement spontané des substances ; les sulfures précités ont été soumis à une excitation par les rayons X. Aucune de ces nombreuses expériences n'a donné aux corps phosphorescents une activité analogue à celle qu'avait manifestée l'épreuve ci-dessus.

J'ajouterai que parmi les substances étudiées la blende hexagonale n'a jamais donné d'effet. J'ai expérimenté soit sur un échantillon de sulfure de zinc préparé par M. Ch. Henry, soit avec de très beaux échantillons de sulfure de zinc phosphorescent, préparés il y a plus de trente ans par MM. Sainte-Claire Deville et Troost, et obligeamment donnés à mon père à cette époque. Aucun de ces échantillons soumis aux divers modes d'excitation et de refroidissement préalables n'a manifesté d'émission de rayons

pénétrants. Il en a été de même de divers échantillons de platinocyanures et de divers échantillons de fluorine, dont on avait essayé de recueillir l'émission en les échauffant.

Aucune de ces substances n'a provoqué d'une manière appréciable la décharge de l'électroscope.

On serait donc fondé à attribuer l'épreuve si intéressante étudiée plus haut à un accident d'expérience, si cet accident ne s'était pas également produit dans les recherches d'autres expérimentateurs.

L'expérience de M. Niewenglowski a déjà été mentionnée.

Le jour même où je présentais à l'Académie l'épreuve dont il a été question plus haut, M. Troost (1) montrait des épreuves photographiques obtenues avec des échantillons anciens de blende hexagonale artificielle, au travers des parois d'une boîte en carton; ceux-ci avaient donné des effets tellement intenses que notre confrère proposait cette substance comme source de rayons actifs dans les applications radiographiques.

Puis dans la séance suivante (2), après que j'eus signalé la disparition de l'activité du sulfure de calcium, M. Troost exposa que les échantillons de la blende artificielle dont il s'était servi pour ses premières expériences, excités à plusieurs reprises par la flamme du

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXII, p. 564. (Sur l'emploi de la blende hexagonale artificielle pour remplacer les ampoules de Crookes.)

(2) *Id. Ibid.*, p. 694.

magnésium, après avoir donné pendant quelque temps de bonnes épreuves, en ont produit de plus en plus pâles et ont fini par ne plus rien produire. Un nouvel échantillon récemment préparé a agi efficacement dans les conditions des premières expériences; puis l'activité a disparu et les expériences n'ont plus été renouvelées.

On voit donc que ces phénomènes ne sont pas dus à des accidents d'expérience ; mais si la cause de leur production est encore inconnue ceux-ci n'en sont pas moins intéressants. A ce point de vue, l'épreuve unique obtenue le 7 mars 1896 et qui a servi de base à cette étude est une des plus importantes par la netteté et la multiplicité des renseignements qu'elle fournit.

Malheureusement l'assimilation avec les effets produits par les rayons de l'uranium et l'apparence d'effets de réflexion et de réfraction m'avaient conduit alors à attribuer aux rayons de l'uranium des propriétés analogues à celles de la lumière, propriétés qu'ils ne possèdent pas.

En terminant ce chapitre je citerai encore d'autres expériences négatives.

Lorsque j'ai publié mes premières observations sur le rayonnement de l'uranium, quelques personnes ont cherché à rapprocher cette constatation des expériences faites autrefois par M. Niepce de Saint-Victor avec divers papiers, dont les uns étaient imprégnés d'acide tartrique ou de nitrate d'urane et dont d'autres n'avaient reçu aucune substance étrangère.

Ces papiers préalablement insolés, et placés ensuite à une petite distance de plaques photographiques, provo-

quaient la réduction de sels d'argent. Bien que, pour expliquer ces phénomènes, Foucault ait émis l'hypothèse d'un rayonnement inconnu, il fut démontré que cet effet, qui ne se produisait ni au travers du verre, ni au travers d'une mince lame de mica, était dû à des actions chimiques provenant de la décomposition des matières organiques ou salines par la lumière. Le nitrate d'urane figure, il est vrai, parmi ces matières. Ce sel est facilement réduit par la lumière en sel uraneux. L'uranium est en quantité tellement faible sur ces papiers, que pour avoir pu produire une impression appréciable sur les plaques que l'auteur employait, il eût fallu plusieurs mois de pose. M. Niepce de Saint-Victor n'a donc pu observer le rayonnement de l'uranium. L'efficacité d'un écran de verre ou de mica pour arrêter l'action suffit, du reste, pour démontrer que les phénomènes observés n'étaient pas produits par les nouveaux rayons.

Comme contrôle, j'ai étudié, soit par la méthode photographique au travers du papier noir, soit par la méthode électrique les effets du papier insolé et de l'acide tartrique. Malgré la grande sensibilité des dispositions expérimentales je n'ai obtenu que des résultats négatifs, même avec des poses très longues sur les plaques photographiques, ou en laissant les matières agir pendant plusieurs heures sur les feuilles d'or d'un électroscope qui, pendant ce temps, ont conservé une déviation pratiquement constante.

CHAPITRE III

EXPÉRIENCES ET MESURES ÉLECTRIQUES. — RÔLE DES GAZ AMBIANTS

Novembre 1896. — Mai 1897.

On a vu plus haut que la rapidité de la décharge d'un corps électrisé mesurait un effet dû au phénomène nouveau. Cette méthode m'a permis d'aborder de suite l'étude de quelques problèmes, et en particulier de rechercher les conditions dans lesquelles le rayonnement produisait la décharge. Les dispositions expérimentales employées au début furent celles qui se prêtèrent à une réalisation rapide, mais ce ne furent pas les plus simples.

On a d'abord fait usage de l'électroscope dont il a été question dans la description des premières observations, et c'est seulement un peu plus tard que l'on a fait des mesures pouvant se ramener à des déterminations absolues.

En novembre 1896 l'on a repris une série de mesures de la déperdition de l'électroscope sous l'influence du disque d'uranium dont il a déjà été question, et, dans des conditions identiques à celles des expériences antérieures, les vitesses de déperdition obtenues ont été trouvées les

mêmes, ce qui vérifiait une fois de plus que l'intensité du rayonnement de l'uranium ne variait pas d'une manière appréciable pendant l'espace de plusieurs mois. On a ensuite abordé les diverses questions suivantes :

§ 1. — *Modification de l'air traversé par les nouveaux rayons.*

Je me suis proposé de rechercher si l'air modifié par le rayonnement de l'uranium conservait pendant quelques instants la propriété de décharger les corps électrisés, comme l'avait observé M. J. J. Thomson, pour les gaz traversés par les rayons X, et M. Villari, pour l'air modifié par des étincelles électriques.

Dans ce but, après avoir soumis la masse gazeuse au rayonnement considéré, on la fait passer sur un corps électrisé dont on étudie la déperdition.

L'expérience a mis en évidence ce fait, que les gaz rendus conducteurs, ou se comportant comme tels pendant qu'ils sont traversés par les rayons de l'uranium, conservent cette propriété pendant quelques instants.

Après avoir essayé plusieurs dispositifs, on a fait de nombreuses mesures dans les conditions suivantes (1).

Un courant de gaz (air ou acide carbonique) traverse un tube de verre contenant un tampon de coton pour arrêter les poussières, puis un second tube de verre où l'on pouvait enfermer un sel d'uranium. Ce tube débouche

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIII, p. 857.

près de la boule de l'électroscope à feuilles d'or dont le bouchon isolant de diélectrine était protégé par un manchon de cuivre, comme l'indique la figure ci-contre (fig. 5). Dans une autre série d'expériences on a substitué au dernier tube de verre une boîte en carton au milieu de laquelle on pouvait disposer le disque d'uranium métallique dont il a déjà été plusieurs fois question : deux ouvertures dont l'une débouchait près de l'électroscope permettaient de faire

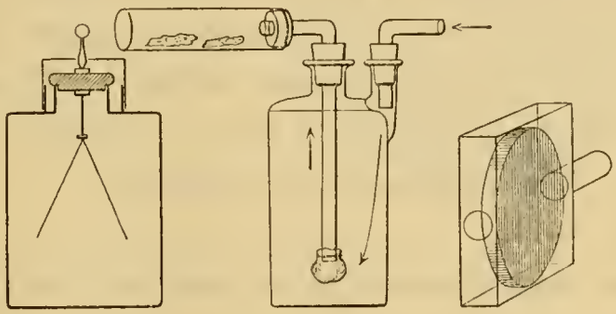


Fig. 5.

traverser la boîte par un courant de gaz et de diriger celui-ci sur la boule électrisée.

Dans ces conditions lorsqu'on ne place pas l'uranium ou un sel de ce métal dans l'appareil, l'électroscope reste chargé et ne présente qu'une déperdition très faible que l'on peut du reste mesurer. Cette déperdition augmente très peu lorsqu'on vient à faire passer le courant gazeux, si celui-ci est bien dépouillé de poussières. Lorsqu'on arrête le courant gazeux et qu'on place soit l'uranium dans la boîte, soit le sel d'uranium dans le tube, l'électroscope accuse une déperdition faible due à l'action du rayonnement qui atteint le gaz enveloppant la boule, soit directement par les ouvertures, soit au travers des

enveloppes. Si l'on met alors en mouvement le courant gazeux, la déperdition devient considérable. Cette augmentation se produit encore lorsque le métal ou le sel sont enveloppés de papier noir ou d'une feuille mince d'aluminium; mais alors l'effet est plus faible que si l'uranium ou le sel sont directement en contact avec le courant gazeux.

Voici le résumé de quelques séries dont nous donnons les nombres extrêmes et les résultats moyens; le temps de chute des feuilles d'or a été mesuré de degré en degré, et les séries ont été parfaitement régulières comme celles des tableaux du chapitre Ier. C'est pourquoi nous avons jugé inutile d'en publier tous les détails.

SULFATE DOUBLE D'URANIUM ET DE POTASSIUM (tube de verre).

19 novembre 1896.				20 novembre 1896.			
α	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	Courant d'air.	α	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	Courant d'air.
1° Avant d'introduire le sel d'uranium.			0,05				
2° Sel d'uranium et courant d'air.			0,79	Sel d'uranium et courant d'air.			0,86
16°24'	0	»		16°	0	»	
13°30'	3m00	0,966		12°	4m2s	0,992	
3° Air au repos. Sel d'uranium.				Sel d'uranium, air au repos.			
12°40'	5m0	»		11°45'	4m50s	»	
12°	9m0	0,475		11°15'	8m40s	0,130	
4° Sel d'uranium et courant d'air.			0,63	Abandonné à lui-même jusqu'au lendemain, l'électroscope tombe de 19°30' à 8°48' en 20 heures, soit une perte de 0',0089 par seconde.			
12°	9m0	»					
10°	11m30s	0,80					
5° Sel d'uranium, air en repos.							
9°40'	12m0	»					
9°30'	13m0	0,160					

DISQUE D'URANIUM (boîte de carton).

20 novembre 1896.			
α	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	Courant d'air.
1° Uranium et air au repos.			
18°	0	»	
17°	3m	0,333	
2° Uranium et courant d'air.			
16°30′	3m35s	»	1,78
14°	4m50s	2,000	
3° Uranium et air en repos.			
13°30′	5m30s	»	
13°	7m30s	0,300	
4° Uranium et courant d'air.			
12°30′	7m50s	»	
9°	10m00	1,615	1,33
5° Uranium et air en repos.			
8°45′	10m40s	»	
8°	13m35s	0,257	
Courant d'air seul.			0,074
Plus tard l'électroscope seul perd..			0,093

20 novembre 1896 (*suite*).			
α	t	$\frac{d\alpha}{dt}$	Courant d'air.
6° Uranium et air au repos.			
21°	0	»	
19°	3m35s	0,558	2,39
7° Uranium et courant d'air.			
16°	0	»	
10°	2m2s	2,951	
Jusqu'au lendemain l'électroscope tombe de 22° à 11°24 en 20 heures soit 0,0088.			
21 novembre 1896.			
Disque d'uranium enveloppé d'une feuille de papier noir, dans la boîte de carton.			
L'électroscope perd 0,01.			
1° Uranium enveloppé et courant d'air.			
17°	0		
14°	4m40s	0,642	0,365
2° Uranium enlevé.			
13°	6m00	»	»
12°	14m5s	»	0,277
3° Air au repos.			
11°30′	0	»	»
11°	2m50s	0,176	»

Ces premiers tableaux mettent nettement en évidence le fait, que l'air modifié par le rayonnement conserve sa propriété conductrice pendant quelques instants. L'influence d'une feuille de papier noir a réduit l'action dans un rapport qui est du même ordre que celui qui a été observé pour le rayonnement direct. Le rapport entre les deux nombres, en supposant les courants d'air identiques, a été trouvé égal à 0,13. On avait trouvé pour le rayonnement direct 0,11 : la modification produite sur le gaz par l'uranium métallique est environ trois fois plus grande que celle qui est produite par le sulfate double, rapport

du même ordre de grandeur que celui qui a été trouvé pour le rayonnement direct.

On a contrôlé l'effet qui vient d'être observé par l'expérience suivante :

Dans un tube en verre ouvert par les deux bouts on a fixé au milieu, par un scellement à la paraffine, une sphère de cuivre, réunie à un conducteur qui venait toucher la boule de l'électroscope (fig. 6).

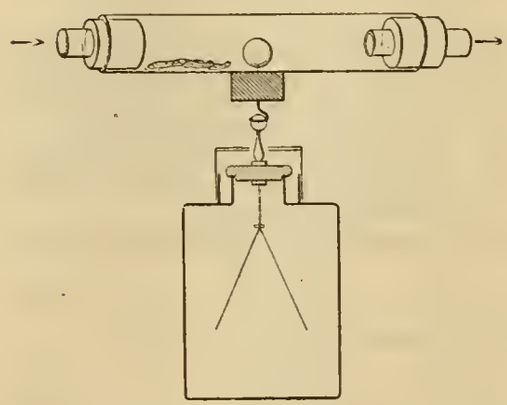


Fig. 6.

Si l'on place quelques fragments de sulfate double uranico-potassique dans le tube, l'électroscope se décharge; mais si l'on vient à souffler l'air de façon à le faire passer sur le sel d'uranium avant d'atteindre la boule de cuivre, la déperdition est considérablement augmentée.

Dans une expérience faite le 26 décembre 1896, on a eu :

α	t	$\frac{d\alpha}{dt}$
degrés	m. sec.	
	Air au repos.	
21°30′	0	»
20°30′	2 30	0,400
	Courant d'air.	
20	4	»
18	6 20	0,805

La vitesse de déperdition a été doublée.

L'air joue donc le rôle principal dans le phénomène de la décharge; il s'ensuit que si pendant l'action on enlève constamment l'air modifié, on ralentit la décharge de l'électroscope. Pour réaliser cette expérience on a disposé le disque d'uranium au-dessus de la boule de l'électroscope en le supportant par un cylindre de paraffine percé de deux ouvertures latérales de manière à introduire deux tubes au moyen desquels on peut faire circuler un courant d'air perpendiculairement à l'axe du cylindre (fig. 7). Ce cylindre avait 4 centimètres de haut et les tubes de verre avaient 21 millimètres de diamètre. Le disque d'uranium pouvait être soit isolé, soit mis en communication avec le sol. Dans le premier cas il se chargeait jusqu'à un maximum d'une vingtaine de volts diminuant ensuite avec le potentiel de l'électroscope, ainsi qu'on le verra plus loin.

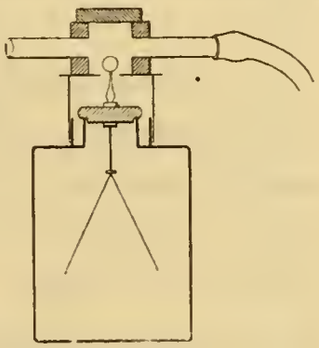


Fig. 7.

Les résultats suivants sont les valeurs extrêmes de séries très régulières pour lesquelles on a déterminé le temps de la diminution de l'écart des feuilles d'or de degré en degré. Les temps inscrits dans le tableau ci-contre, et évalués en secondes, correspondent à une chute des feuilles d'or de 20° à 10°, c'est-à-dire à une chute de potentiel de 1 800 à 1 000 volts environ.

Dates des séries	23 DÉC. 1896	24 DÉC. 1896	26 DÉC. 1896	20-21 JANVIER 1897	
Numéros des séries	1	2	3	4	5
OBSERVATIONS.	Même vitesse du courant d'air.		Courant d'air plus fort.		On interpose 2 feuilles minces d'aluminium
Air en repos. Uranium isolé	»	»	143	»	»
Air en repos. Uranium à la terre	136,5	140,5	138	146	191
Air en mouvement	165,0	171,0	173	193	236
Rapports	0,82	0,82	0,80	0,76	0,80

Les deux feuilles d'aluminium interposées dans la 5e série étaient placées sous le disque d'uranium; elles avaient environ chacune $0^{mm},0008$ d'épaisseur. On voit que le rapport des effets produits par l'enlèvement de l'air est le même soit sous l'influence du rayonnement direct total, soit sous l'influence du rayonnement transmis au travers de l'aluminium.

On a encore varié cette expérience en employant un courant d'air plus fort. Le disque d'uranium a été placé verticalement à $4^{c},2$ du bouton de l'électroscope et on a projeté sur le disque, dans une direction faisant environ 30° avec la normale à son plan, le courant d'air d'une soufflerie de manière à rejeter loin de l'électroscope l'air qui a séjourné près du disque. La décharge de l'électroscope a été alors ralentie, et la vitesse de chute des feuilles d'or réduite environ au tiers de la valeur qu'elle avait dans les mêmes conditions quand l'air était en repos. Voici les valeurs extrêmes, moyennes de séries très régulières et très concordantes :

29 DÉCEMBRE 1896.	DURÉE de la variation de l'angle des feuilles d'or de 20° à 10°.	RAPPORTS.
	secondes	
Air en repos	76	1,000
Courant d'air des expériences précédentes	102	0,745
Courant d'air de la soufflerie. . .	232	0,327

Des expériences faites avec un courant de gaz acide carbonique ont conduit aux mêmes conclusions.

Ces expériences variées et concluantes montrent donc que la décharge des corps électrisés se fait par l'intermédiaire du gaz ambiant.

§ 2. — *Expériences dans l'air à diverses pressions.*

Une conséquence immédiate des expériences qui précèdent est qu'en raréfiant l'air autour des conducteurs électrisés on doit ralentir la vitesse de déperdition due au rayonnement de l'uranium, et l'annuler dans le vide absolu. C'est ce qu'ont montré les expériences.

Pour ces observations, après divers essais faits avec une cloche de verre où l'on raréfiait l'air, et dans laquelle le disque d'uranium employé dans les expériences précédentes agissait sur une boule électrisée, isolée et reliée à un électroscope, j'ai utilisé une petite sphère d'uranium métallique de $13^{mm},70$ de diamètre, habilement taillée par M. Werlein dans un lingot d'uranium presque pur que je devais à l'obligeance de M. Moissan.

Cette sphère d'uranium, soutenue par des supports parfaitement isolants, dans l'air ou dans divers gaz, perd sous l'influence de son rayonnement toute charge électrique qui lui a été communiquée.

On a employé, entre autres, la disposition suivante pour étudier cette déperdition. Une ampoule de verre (fig. 8) munie d'une tubulure latérale à robinet, et s'adaptant sur une trompe à mercure, présentait à la partie inférieure une électrode en forme de coupole, que l'on reliait à la terre. La sphère d'uranium était suspendue et isolée au centre de l'ampoule, reposant sur un anneau maintenu par une tige de cuivre qui traversait un bouchon de diélectrine, coulée dans un tube conique rodé, fermant l'orifice supérieur de l'ampoule. La sphère d'uranium ainsi isolée était mise en relation soit avec un électromètre de Hankel gradué pour la mesure des faibles potentiels, soit avec un électroscope à feuilles d'or gradué également, soit encore, pour certaines mesures de comparaison, avec ces deux électromètres réunis entre eux. On chargeait le système de la sphère d'uranium et de l'électromètre, et l'on étudiait la vitesse de déperdition de l'électricité lorsque l'ampoule était pleine de gaz ou lorsque le gaz y était raréfié.

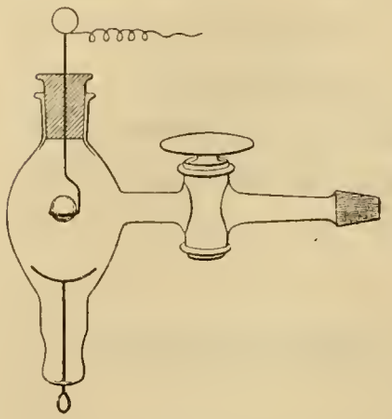


Fig. 8.

Les expériences ont été résumées dans des tableaux détaillés publiés à la fin de ce chapitre. Les vitesses de déperdition y sont exprimées en volts par seconde. Pour avoir le débit d'électricité il faudrait multiplier cette déper-

dition par la capacité du système. Celle-ci est, du reste, variable avec la divergence des feuilles d'or, et on verra plus loin comment on peut l'évaluer.

Dans ces expériences il faut tenir compte de la déperdition qui se produit en l'absence du rayonnement étudié, déperdition due au défaut d'isolement du système. Pour quelques déterminations qualitatives on s'est borné à retirer la sphère d'uranium, ce qui modifiait un peu la capacité totale; mais pour des expériences plus précises on substituait à la sphère d'uranium une sphère de cuivre de même diamètre, et on étudiait la déperdition dans les conditions où l'on avait expérimenté avec l'uranium.

Je donnerai seulement ici un résumé succinct des tableaux d'expériences qui se trouvent à la fin de ce chapitre. Ceux-ci mentionnent d'abord des expériences faites avec la sphère d'uranium sous une cloche où l'air était raréfié; la diminution de la déperdition a été sensiblement proportionnelle à la racine carrée de la pression (1).

	16 FÉVRIER 1897.		28 FÉVRIER 1897.	
	PRESSIONS.	SPHÈRE D'URANIUM.	PRESSIONS.	SPHÈRE ET FRAGMENT D'URANIUM.
	millimètres.	volts.	millimètres.	
	760	0,1581	761	0,2461
	18	0,0243	13	0,0273
Rapports. .	0,154	0,153	0,130	0,111

Les rapports inscrits dans la colonne des pressions sont les rapports des racines carrées de ces pressions.

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. CXXIV, p. 443.

Les expériences plus précises faites avec l'ampoule de verre ont montré que la variation de la déperdition ou du débit électrique était plus rapide que celle du rapport des racines carrées des pressions, ainsi que le montre le résumé suivant :

EXPÉRIENCES DANS L'AIR A DIVERSES PRESSIONS

PRESSIONS H en millimèt. de mercure.	19 MARS 1897 de 13h,96 à 7h,29.			20 MARS 1897 de 14h,70 à 7h,63.			28 MARS 1897 de 15h,55 à 8h,21.		
	$\frac{dV}{dt}$ observé.	Rapports. $\frac{dV}{dt}$	Rapports. $\sqrt{H}$	$\frac{dV}{dt}$ observé.	Rapports. $\frac{dV}{dt}$	Rapports. $\sqrt{H}$	$\frac{dV}{dt}$ observé.	Rapports. $\frac{dV}{dt}$	Rapports. $\sqrt{H}$
	volts			volts			volts		
764,5	»	»	»	0,1440	1	1	»	»	»
760,8	0,1380	1	1	»	»	»	»	»	»
745,4	»	»	»	»	»	»	0,1513	1	1
362,5	»	»	»	0,1019	0,707	0,687	»	»	»
334,0	»	»	»	»	»	»	0,1165	0,769	0,670
111,8	»	»	»	»	»	»	0,0544	0,359	0,387
94,2	»	»	»	»	»	»	0,0482	0,318	0,355
68,5	0,0265	0,192	0,300	»	»	»	»	»	»

Les nombres d'une même série sont seuls comparables. Les divergences d'une série à une autre sont imputables à des différences dans la capacité totale du système. Dans les deux dernières séries on voit que la variation du débit est d'abord moins rapide que la variation du rapport des racines carrées des pressions, puis que, pour des faibles pressions, elle devient plus grande que celle de ce rapport.

Dans le but de montrer que la déperdition s'annule dans le vide absolu, ces expériences avaient été précédées de mesures spéciales faites dans l'air très raréfié ; dans ces séries la déperdition par les supports avait dû être mesu-

rée avec le plus grand soin, et être rendue aussi faible que possible.

EXPÉRIENCES DANS L'AIR TRÈS RARÉFIÉ

SÉRIES.	PRESSIONS EN MILLIMÈTRES DE MERCURE.	POTENTIELS. EN VOLTS.	DÉPERDITION $\frac{dV}{dt}$ DU SYSTÈME AVEC LA SPHÈRE D'URANIUM.	DÉPERDITION SANS LA SPHÈRE D'URANIUM.
	millimètres	volts	volts	volts
3 mars 1897.	0,0145	13,25	0,00400	0,002
	Id.	11,82	0,00230	»
9 mars 1897.	Id.	13,90	0,00245	0,00088
	Id.	6.60	0,00126	»
10 mars 1897.	0,0125	1100,00	0,170	0,170 (calcul)

Ces expériences montrent que dans le vide presque absolu la déperdition observée est de l'ordre de grandeur de celle qui résulte des défauts d'isolement des supports, et on peut en conclure que dans le vide absolu la sphère d'uranium parfaitement isolée garderait la charge qu'on lui aurait donnée. Elles achèvent de démontrer que la déperdition observée sous l'influence du rayonnement de l'uranium est due à une modification provoquée dans les gaz ambiants.

§ 3. — *Expériences avec divers gaz.*

Le même dispositif a permis de faire quelques mesures avec différents gaz en chargeant la sphère d'uranium soit à des potentiels faibles, soit au contraire à des potentiels élevés.

Le résumé des tableaux publiés à la fin du chapitre conduit aux valeurs suivantes :

ACIDE CARBONIQUE

	5 mars 1897.		9 mars 1897.	
	Air.	Acide carbonique.	Air.	Acide carbonique.
Potentiel initial.	15v,00	15v,00	15v,55	16v,00
Pression.	747,6	747,6	764,5	764,6
Température.	+ 10°,5	+ 10°,5	+ 10°,5	+ 14°,5
Déperdition de l'appareil. . .	0v,00158	0v,00158	0,00088	0,00088
$\frac{dV}{dt}$ corrigé de la déperdition. .	0,13015	0v,11555	0,13019	0,11682
Rapports.	0,8878		0,8818	

HYDROGÈNE

	4 mars 1897.		11 mars 1897.			
	Air.	Hydrogène.	Air.	Hydrogène.	Air.	Hydrogène.
Potentiel initial.	15v,5	15v,5	15v,00	15v,00	1800v	1800v
Pression. . . .	748,8	748,8	762,5	762,5	763,2	763,2
Température. .	+ 11°	+ 11°	+ 14°,2	+ 13°,2	+ 13°	+ 13°
Déperdition de l'appareil . .	0,00162	0,00162	0,00161	0,00161	0,198	0,252
$\frac{dV}{dt}$ corrigé de la déperdition.	0,13093	0,05377	0,1338	0,05340	0,502	0,116
Rapports . .	0,4114		0,3991		0,230	

En résumé on a pour les trois gaz étudiés.

Potentiels	faibles	élevés.
Air.	1,000	1,000
Acide carbonique	0,885	»
Hydrogène	0,405	0,230

On doit signaler la différence très notable des résultats obtenus avec les potentiels faibles et avec les potentiels

élevés. On verra plus loin la raison pour laquelle ces derniers résultats doivent seuls être pris en considération.

§ 4. — *Expériences à diverses températures.*

La recherche d'une variation possible dans l'intensité de l'émission de l'uranium à diverses températures était une question fondamentale qui m'a préoccupé tout d'abord, comme elle a préoccupé plus tard divers physiciens. L'existence d'une activité permanente dans l'uranium fondu au four électrique montrait qu'une élévation considérable de température n'avait pas fait perdre ses propriétés aux molécules d'uranium. Cependant il importait de reconnaître si l'émission n'avait pas quelque relation avec la température.

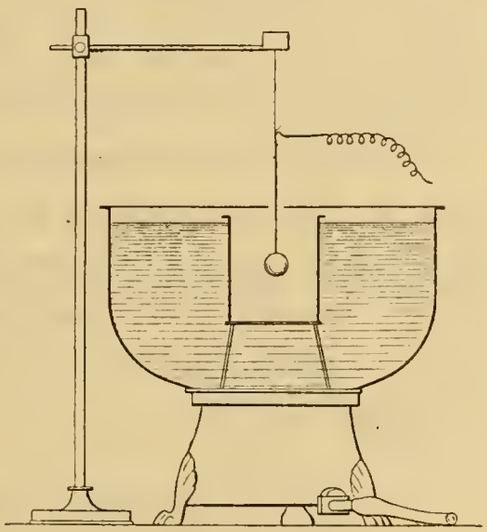


Fig. 9.

J'ai recherché si la déperdition provoquée dans l'air par la petite sphère d'uranium dont il a déjà été question subissait des variations notables pour des températures différentes. Cette petite sphère avait été suspendue à un fil de cuivre très fin, relié à l'électroscope à feuilles d'or. Le fil métallique était lui-même soutenu par un fil de soie suspendu à un support en paraffine (fig. 9).

La sphère d'uranium plongeait à l'intérieur d'un cylindre

de cuivre fermé par le bas, de 10 centimètres de diamètre et de 12 centimètres de hauteur, maintenu au milieu d'une marmite en fonte placée sur un fourneau et remplie d'eau. Le cylindre et la marmite étaient en communication avec la terre.

En portant l'eau à diverses températures et en attendant que celles-ci fussent sensiblement stationnaires, pour éviter les courants de convection dans l'intérieur du cylindre, on a obtenu des séries très régulières dont les moyennes sont résumées dans le tableau suivant.

Ce tableau donne seulement les déviations des feuilles d'or de l'électroscope et les temps auxquels les déviations successives ont été observées lorsque le système préalablement chargé était abandonné à lui-même. L'identité des séries a rendu inutile le calcul des vitesses de déperdition à chaque instant.

RÉSUMÉ DES OBSERVATIONS FAITES DANS L'AIR

A DIVERSES TEMPÉRATURES LE 19 JANVIER 1897

α	V	θ = 7°	θ = 9°	θ = 75°	θ = 83°
	volts.	min. sec.	min. sec.	min. sec.	min. sec.
20°	1802	0	0	0	0
19°	1730	51,7	53	50	53
18°	1658	1 47,5	1 51,5	1 50	1 54
17°	1585	2 45,2	2 49	2 44	2 47
16°	1511	3 44	3 47,5	3 46	3 48

Étant données les conditions des expériences, ces séries, à des températures comprises entre 7° C. et 83° C., sont pratiquement identiques. Entre ces limites l'influence de la température sur l'émission peut donc être considérée

comme nulle, à moins que l'effet produit sur l'air à diverses températures et, par suite, à diverses densités soit de sens contraire et sensiblement égal à celui qui affecterait l'intensité de l'émission. Des expériences faites en entourant le cylindre d'un mélange réfrigérant, et surtout des expériences faites beaucoup plus tard en portant l'uranium seul à la température de l'air liquide ont montré qu'il n'y avait aucune influence appréciable de la température sur l'intensité de l'émission de l'uranium. Ces dernières expériences seront rapportées dans une autre partie de ce mémoire (chapitre VII).

§ 5. — *Mesure du débit d'électricité en fonction du potentiel.*

Le débit d'électricité provoqué par le rayonnement de l'uranium est fonction du potentiel des corps électrisés. Nous verrons plus loin qu'il dépend de l'intensité du champ électrique produit dans les gaz qui absorbent le rayonnement; mais avant que cette notion fût bien établie, la recherche d'une relation entre le débit et le potentiel des corps électrisés a présenté diverses difficultés.

J'en fait à ce sujet deux séries de mesures : les premières avec un électroscope à feuilles d'or; les secondes avec un électromètre à quadrants; le premier instrument a dû être préalablement gradué, et cette opération a été assez difficile, mais l'appareil présentait un isolement remarquable : au contraire j'ai eu quelque peine à réaliser un isolement suffisant dans un électromètre à quadrants. Si V est le potentiel d'un système, C sa capacité, la valeur

du débit est $-C\frac{dV}{dt}$. Or il arrive, surtout pour l'électroscope à feuilles d'or, que la capacité de cet instrument est variable avec la position des feuilles d'or, de telle sorte qu'il a fallu faire pour cet appareil une graduation appropriée.

La meilleure méthode pour mesurer le débit eût été l'emploi d'un galvanomètre; mais le rayonnement de l'uranium était trop faible pour que ce moyen de mesure pût être employé. Dans diverses expériences, entre autres dans un essai fait le 10 février 1897, j'ai reconnu que les traces de courant que l'on pouvait déceler correspondaient à la limite de la sensibilité des galvanomètres que je possédais, et ne pouvaient servir à des mesures dans les conditions que je pouvais réaliser.

1° *Mesures avec l'électroscope à feuilles d'or.* — Comme je viens de le dire, il a fallu préalablement graduer l'électroscope et en particulier déterminer les potentiels qui correspondaient à des divergences déterminées des feuilles d'or. On a employé à cet effet une méthode dérivée de celle de l'électroscope condensateur de Volta. Le bouton de l'électroscope a été mis en communication avec l'un des plateaux de cuivre d'un condensateur à air. Ce plateau avait $10^c,8$ de rayon; il était parfaitement isolé et au-dessus se trouvait un plateau plus grand, mobile, pouvant s'éloigner du premier en lui restant parallèle. Trois cales de papier paraffiné permettaient d'amener les plateaux à une distance d'environ $0^{mm},33$; puis on les chargeait avec une pile de 5 à 25 éléments, et on écartait les plateaux à $3^c,4$. Si la capacité seule du condensateur inter-

venait, le potentiel du plateau isolé serait alors celui de la pile multiplié par le rapport inverse des distances, soit 103.

En tenant compte de la capacité du fil de jonction, ainsi que de celle de l'électroscope et des faibles variations de celle-ci, on a pu dresser un tableau de valeurs approximatives des potentiels correspondant aux diverses déviations des feuilles d'or.

Ce tableau une fois dressé, on a disposé au-dessus du bouton de l'électroscope le disque d'uranium dont il a été question plus haut, et on a étudié la vitesse de la décharge en chargeant l'électroscope puis en abandonnant ce système à lui-même et en déterminant en divers instants les positions des feuilles d'or. Pour éviter de tenir compte des variations de la capacité de l'électroscope on avait relié celui-ci à l'une des armatures d'un condensateur dont la capacité était suffisante pour rendre négligeable la variation due à l'électroscope.

On a ainsi obtenu les résultats suivants, corrigés de la déperdition de l'appareil; celle-ci était déterminée en retirant le disque d'uranium et en abandonnant à lui-même le système chargé (1).

---

(1) Dans la publication des *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIV, p. 444, les corrections n'avaient pas été faites, ni pour les potentiels, ni pour la déperdition des appareils.

DÉPERDITION PROVOQUÉE PAR LE DISQUE D'URANIUM

ÉLECTROSCOPE A FEUILLES D'OR ET CONDENSATEUR

Expériences du 1er mars 1897.

DÉVIATIONS.		POTENTIELS EN VOLTS.		MOYENNES des observations.	Δt	MOYENNES des Δt successifs.	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$	DÉPERDITION des appareils.	$\frac{dV}{dt}$	$\frac{dV}{dt}$
	α	V	ΔV	t		$\Delta' t$					
	deg.										
100	20	1801,8	»	0 sec	»	»	»	»	»	»	»
99,5	19	1730,3	71,5	15,9	15,9	15,9	4,49	4,49	0,59	3,90	3,90
99	18	1658,2	72,1	31,9	16	16,1	4,50	4,48	0,56	3,94	3,92
98,5	17	1585,0	73,2	48	16,1	16,3	4,54	4,49	0,53	4,01	3,96
98	16	1511,0	74	64,2	16,2	16,5	4,57	4,48	0,49	4,08	3,99
97,5	15	1436,0	75	80,5	16,3	16,7	4,60	4,49	0,46	4,14	4,03
97	14	1359,9	76,1	97	16,5	17	4,61	4,47	0,42	4,19	4,05
96,5	13	1282,7	77,2	114	17	17,1	4,54	4,51	0,39	4,15	4,12
96	12	1204,0	78,7	131,5	17,5	17,5	4,44	4,44	0,36	4,08	4,08
95,5	11	1124,0	80	149,6	18,1	17,7	4,42	4,52	0,33	4,11	4,19
95	10	1042,5	81,5	168	18,4	18,2	4,42	4,48	0,30	4,12	4,18
94,5	9	958,8	83,7	187	19	18,8	4,40	4,45	0,27	4,13	4,18
94	8	872,6	86,2	207	20	19,6	4,31	4,40	0,24	4,07	4,16
93,5	7	782,9	89,7	228	21	20,6	4,27	4,35	0,21	4,06	4,14
93	6	689,3	93,6	252,6	23,6	21,7	3,96	4,31	0,18	3,78	4,13
92,5	5	590,6	98,7	276,3	23,7	23,4	4,16	4,22	0,15	4,01	4,07
92	4	486,2	104,4	301,3	25	25	4,18	4,18	0,12	4,06	4,06
91,5	3	375,4	110,8	330,5	29,2	29,2	4,47	4,47	0,09	4,38	4,38
91	2	256,7	118,7	366,6	35,1	35,1	3,38	3,38	0,06	3,32	3,32
90,5	1	128,7	128	413,3	46,7	46,7	2,75	2,75	0,00	2,75	2,75

Le résultat fondamental mis en évidence par ce tableau est la constance de la vitesse de déperdition $\frac{dV}{dt}$, et par suite la constance du débit d'électricité provoqué par l'uranium, pour des potentiels supérieurs à 300 volts.

Il n'en est pas de même lorsque le potentiel des corps électrisés est faible. Voici, entre autres, les résultats d'une série faite le 28 janvier 1897 en déchargeant, au moyen du même disque d'uranium, un électroscope à une seule

feuille d'or mobile entre deux plateaux électrisés ; les déplacements de la feuille étaient observés avec un microscope muni d'un micromètre oculaire. Les deux plateaux étaient maintenus à des potentiels constants soit par des piles sèches, soit par une pile à eau. Cet appareil (électroscope, n° 2, fig. 10) était réuni avec un condensateur de capacité suffisante pour que les variations de la capacité de l'électroscope fussent négligeables. (Dans la fig. 10 ci-contre, l'électromètre est représenté à gauche ; la partie

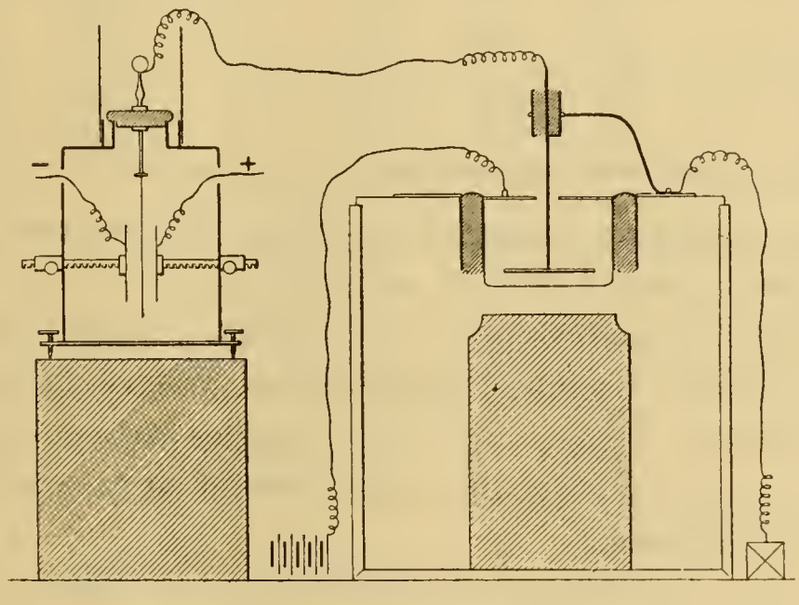


Fig. 10.

droite de la figure est relative à un dispositif qui sera décrit plus loin.) La capacité de ce condensateur n'étant pas exactement la même que celle du système étudié dans le tableau précédent, les nombres ne sont pas directement comparables.

DÉCHARGE PAR LE DISQUE D'URANIUM

Électroscope n° 2 et condensateur.

VOLTAGE MOYEN. V_1	MICROMÈTRE.	POTENTIELS. V	ΔV	TEMPS OBSERVÉS. t	Δt	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$	$\frac{I}{V_1}\frac{\Delta V}{\Delta t}$
		v.	v.	m. s.			
»	50	15,00	»	0	»	»	»
14,35	45	13,70	1,30	13	13	0,1000	0,00696
13,00	40	12,30	1,40	26,5	13,5	0,1037	0,00798
11,57	35	10,85	1,45	42	15,5	0,0935	0,00808
10,09	30	9,33	1,52	59,5	17,5	0,0868	0,00864
8,56	25	7,79	1,54	1 19	19,5	0,0790	0,00922
7,00	20	6,21	1,58	1 44	25	0,0632	0,00900
5,43	15	4,65	1,56	2 16,5	32,5	0,0480	0,00884
3,87	10	3,10	1,55	3 5	48,5	0,0319	0,00824
2,63	7	2,16	0,94	3 51	46	0,0204	0,00775
1,85	5	1,54	0,62	4 36	45	0,0138	0,00746

On voit combien, dans ces conditions, le débit varie avec le potentiel, auquel il est à peu près proportionnel.

J'ai cité ces nombres pour montrer le parti que l'on peut tirer de l'électroscope à feuilles d'or. Malgré la grande incertitude qui règne pour l'évaluation des forts potentiels, j'avais conservé l'usage de cet instrument en raison de son excellent isolement.

Au cours des études de graduation j'ai reconnu que dans les conditions des expériences la variation de potentiel pour une même variation angulaire, $\frac{\Delta V}{\Delta \alpha}$ était sensiblement en raison inverse de la capacité de l'électroscope seul, de sorte que si C_1 est la capacité de cet appareil, on a très sensiblement $C_1 \frac{dV}{d\alpha} = C^{te}$. Or, dans un grand nombre d'expériences, soit avec les rayons X, soit avec l'uranium agis-

sant sur le bouton de l'électroscope, on avait reconnu que, pour des potentiels élevés, on avait très sensiblement $\frac{d\alpha}{dt} = C^{te}$. Il résulte de la remarque qui précède que l'on doit avoir également $C_1 \frac{dV}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt} = C_1 \frac{dV}{dt} = C^{te}$, c'est-à-dire que dans ces expériences le débit d'électricité est indépendant du potentiel quand celui-ci est suffisamment grand.

2° *Mesures avec l'électromètre à quadrants.*

Les déterminations précédentes relativement grossières n'étaient pas suffisantes pour établir comment variait la chute du potentiel des corps électrisés soumis à l'influence du rayonnement de l'uranium lorsque ceux-ci sont portés à des potentiels variables. Pour cette étude il importait de réaliser deux conditions fondamentales : 1° un isolement convenable du système dont on étudiait la déperdition; 2° une disposition telle que la capacité fût pratiquement constante.

L'appareil le plus parfait pour les mesures de potentiels est l'électromètre à quadrants. J'ai d'abord eu quelque peine à réaliser un électromètre à quadrants ayant un isolement convenable. Cependant un appareil construit par M. Boudréaux et dont toutes les pièces sont isolées par des supports en paraffine entourés de manchons de cuivre reliés à la terre a pu donner de bonnes mesures. Ces séries ont été exécutées au laboratoire de physique de l'École polytechnique (1).

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIV, p. 800, 12 avril 1899.

On a choisi, pour étudier la déperdition, le cas simple d'une sphère d'uranium suspendue dans l'air à une distance relativement grande des corps environnants et reliée à l'aiguille de l'électromètre à quadrants dont il vient d'être question. La sphère avait $13^{mm},7$ de diamètre et par suite une surface de $5^{cq},89647$: l'ensemble de la sphère et de l'aiguille de l'électromètre était aussi bien isolé que possible. Les paires de quadrants étaient en relation avec les deux pôles d'une pile dont le milieu était à la terre.

Si l'on définit la capacité de l'aiguille par le rapport de la charge qu'elle prend au potentiel qu'elle indique, cette grandeur est fonction des potentiels des quadrants et de la position que l'aiguille occupe par rapport à ceux-ci. Cependant si les déviations sont proportionnelles aux potentiels et si les potentiels des quadrants sont constants, la capacité de l'aiguille est constante. On peut démontrer facilement cette propriété de la manière suivante :

Soient V_1 et V_2 les potentiels des quadrants, v le potentiel de l'aiguille, θ l'angle de déviation de l'aiguille proportionnelle au couple de torsion qui fait équilibre aux couples électrostatiques. On sait que l'on a, en désignant par K_0 une constante caractéristique de l'appareil :

$$\theta = K_0 (V_1 - V_2) [v - (V_1 + V_2)].$$

Si nous supposons que le milieu de la pile qui charge les quadrants soit mis à la terre, on a $V_1 + V_2 = 0$
d'où

$$V_2 = -V$$

et l'expression de θ devient proportionnelle à v.

$$\theta = 2\,K_0\,V_1 v.$$

Supposons encore que, dans la position d'équilibre, pour $v = 0$, des portions égales de l'aiguille pénètrent dans chaque quadrant. Soit A (fig. 11) l'angle au centre du secteur qui constitue l'aiguille, et α l'angle au centre du secteur engagé dans la paire de quadrants V_1 ; on a $\theta = \frac{A}{2} - \alpha$. La surface de l'aiguille engagée dans la paire de quadrants V_1, se compose de quatre surfaces de secteurs ayant pour angle au centre α, elle est donc égale à $4\pi r^2\alpha = S_1$, r étant le rayon du secteur. Sur cette surface la densité électrique ε_1, est égale à $\frac{1}{4\pi}\frac{v - V_1}{e}$ en désignant par e la distance de l'aiguille aux plateaux inférieur et supérieur des quadrants; la quantité d'électricité sur cette portion du secteur est donc

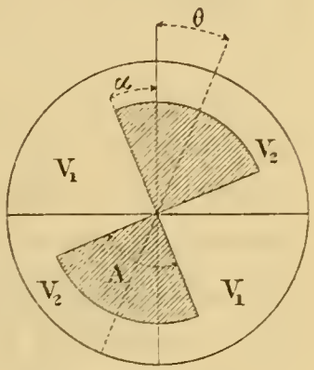


Fig. 11.

$$q_1 = S_1\,\varepsilon_1 = \frac{r^2}{e}\,\alpha\,(v - V_1) = K_1\,\alpha\,(v - V_1).$$

On aurait de même pour l'autre secteur dont l'angle au centre est $(A - \alpha)$

$$q_2 = K_1\,(A - \alpha)\,(v - V_2) = K_1\,(A - \alpha)\,(v + V_1).$$

Si l'on désigne par C, la capacité de l'aiguille définie comme il a été dit ci-dessus, on a :

$$Cv = q_1 + q_2 = K_1[\alpha(v - V_1) + (A - \alpha)(v + V_1)] = K_1[Av + (A - 2\alpha)V_1].$$

or, nous avons vu que l'on avait

$$A - 2\alpha = 2\theta = 4K_0 V_1 v,$$

il vient donc, en divisant les deux membres par v,

$$C = K_1 [A + 4K_0 V_1^2].$$

Pour des valeurs déterminées $\pm V_1$ du potentiel des quadrants, la capacité C est indépendante de l'angle θ et par suite indépendante du potentiel v de l'aiguille, ce qui est la condition que nous cherchions à réaliser.

Si d'une série à une autre on fait varier la charge des quadrants pour faire varier la sensibilité de l'instrument, la capacité de l'aiguille change et les résultats obtenus dans les mesures ne sont plus directement comparables.

La difficulté, soit de maintenir constantes, soit de mesurer les capacités des systèmes étudiés, capacités qu'il fallait rendre nécessairement très faibles pour que la valeur de $\frac{dv}{dt}$ ne fût pas par trop petite, ont rendu les mesures assez délicates. On a représenté graphiquement les résultats obtenus et on a tracé des courbes moyennes qui éliminent en partie les erreurs accidentelles dues aux imperfections de l'électromètre.

L'isolement électrique n'étant pas complet, on a étudié séparément la déperdition par les supports, et la vitesse de déperdition due à cette cause a été retranchée de la vitesse observée, pour avoir l'effet dû à l'uranium.

Les piles qui ont servi à graduer l'instrument étaient des piles zinc, cuivre, eau et glycérine, montées depuis plusieurs années; chaque élément valait en moyenne $0^{\text{volt}},93$. Les nombres suivants sont donnés en prenant ces éléments de pile pour unité de potentiel.

Avec une première disposition les quadrants étant chargés par une pile de 64 éléments dont le milieu était à la terre, ($V_1 = 32$) on a eu les nombres suivants qui résument de nombreuses mesures :

Potentiels.	CHUTE DE POTENTIEL EN UNE SECONDE observée.	CHUTE DE POTENTIEL EN UNE SECONDE corrigée de la déperdition.
ε	ε	ε
35,25	0,1940	0,187
32,15	0,1884	0,182
29,0	0,1832	0,177
27,4	0,1770	0,175
21,2	0,1670	0,164
17,8	0,1615	0,159
14,5	0,1535	0,152
11,32	0,1384	0,137
8,12	0,1191	0,118
5,70	0,1018	0,101
4,05	0,0880	0,088
2,43	0,0609	0,061
1,20	0,0340	0,034

Une seconde série a été faite dans des conditions un peu différentes en chargeant les quadrants avec une pile de 8 éléments, dont le milieu était à la terre ($V_1 = 4$). On a eu des déviations dans les mêmes limites que les pré-

cédentes, mais pour des potentiels plus élevés. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Potentiels.	CHUTE DE POTENTIEL EN UNE SECONDE observée.	corrigée de la déperdition.
227 ε	0,2778 ε	0,233 ε
206,5	0,2744	0,233
175,5	0,2673	0,232
145	0,2592	0,230
114	0,2470	0,224
93,8	0,2376	0,219
72,6	0,2253	0,211
62,3	0,2188	0,206
52	0,2103	0,199
36,5	0,1929	0,185
26,2	0,1754	0,170
21	0,1634	0,159
15,7	0,1487	0,145

Les comparaisons entre les valeurs communes aux deux séries montrent que dans la seconde la capacité était environ 1,03 plus grande que dans la première. La vitesse maximum de la chute du potentiel a été $0,233 \times 0^{v},93 = 0^{v},216$ pour la seconde série.

Dans la publication rappelée plus haut, j'avais relié les résultats des mesures faites à différents potentiels, par la formule empirique

$$\frac{dV}{dt}\left(a + \frac{b}{V}\right) = -1$$

En observant qu'à la surface d'une sphère de rayon R la force F a pour valeur $F = \frac{V}{R}$, cette formule peut encore s'écrire

$$i = -C\frac{dV}{dt} = \frac{C}{a + \frac{b}{RF}} = \frac{F}{mF + n},$$

montrant que le courant i tend vers une valeur constante quand la force du champ a une valeur suffisamment grande; a et b étant proportionnels à C, la valeur limite de i est indépendante de la capacité et du champ. Ce courant a été appelé plus tard par M. Rutherford, *courant de saturation* (1).

On peut déduire de ces déterminations une valeur approchée du débit d'électricité provoqué par le rayonnement de l'uranium dans l'air. L'expression de la force électrique dans l'air à la surface de la sphère est $F = \frac{V}{R} = \frac{V}{0,685}$. Pour 200 volts on a $F = 2,92.10^{10}$ unités électromagnétiques ou environ une unité électrostatique C.G.S.

Le débit a pour expression $i = -C\frac{dV}{dt}$; la plus grande difficulté consiste à évaluer avec une approximation suffisante la capacité C. Dans les conditions de la première série ci-dessus, on a réuni le système de la sphère d'uranium et de l'électromètre avec une sphère de $8^c,116$ de rayon, au moyen d'un fil. Le potentiel a été réduit à 0,386 de sa valeur. Dans ces nouvelles conditions la vitesse de déperdition du système était les 0,33 de sa valeur sans l'adjonction de la sphère. En admettant comme plus précise la mesure électrostatique, et en tenant compte de la capacité du fil qui porte à 10^c la valeur de la capacité ajoutée, on trouve que la capacité du système de l'électromètre et de la

(1) *Philosophical Magazine*, vol. XLVII, p. 109, janvier 1899.

sphère d'uranium est environ 6,28 unités électrostatiques. Pour la disposition de la deuxième série, la capacité serait $6,28 \times 1,03 = 6,47$. La chute de potentiel correspondante $0^{v},216$ équivaut à $\frac{0,216}{300} = 7,2.\,10^{-4}$ unités électrostatiques. Le débit est alors $6,47 \times 7,2.\,10^{-4} = 4,658.\,10^{-3}$ unités électrostatiques ou, en unités électromagnétiques, $\frac{4,658}{3}.\,10^{-13} = 1,55.\,10^{-13}$.

Une expérience antérieure du 12 février 1897 avec la même sphère d'uranium et avec des appareils entièrement différents avait conduit à évaluer le débit de la sphère d'uranium dans l'air à $1,6.\,10^{-13}$ unités électromagnétiques, valeur voisine de la précédente.

Le nombre $1,55.\,10^{-13}$ est relatif à la surface de la sphère qui est de $5^{cq},896$. Pour un centimètre carré, on aurait

$$i = 0,26.\,10^{-13}(\text{C.G.S.}) = 2,6.\,10^{-13} \text{ ampères},$$

nombre qui indique seulement l'ordre de grandeur du courant.

§ 6. — *Expériences diverses.*

Avant d'amener cette étude au point qui vient d'être indiqué, j'avais réalisé un très grand nombre d'expériences, dont on citera seulement quelques-unes (1). On a

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIV, p. 440, 1er mars 1897.

déjà vu que la faiblesse du rayonnement de l'uranium n'avait pas permis de mesurer le débit d'électricité par un galvanomètre. L'évaluation ci-dessus montre, en effet, qu'il eût fallu pouvoir mesurer des courants de l'ordre de 10^{-13} ou 10^{-12} ampères.

On peut, au contraire, mettre en évidence le débit continu au moyen d'un électroscope à décharge.

Deux petites boules de cuivre isolées ont été disposées à une petite distance l'une de l'autre, dans l'air (fig. 12); l'une mise en relation avec un électroscope à décharges ou avec un électromètre, l'autre chargée d'électricité, soit maintenue à un potentiel constant par une pile, soit en relation avec une bouteille de Leyde chargée.

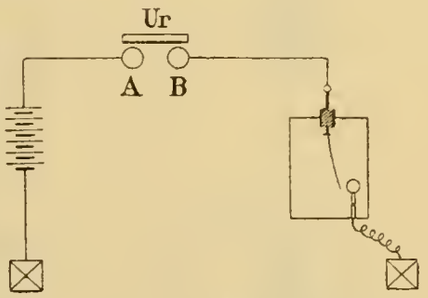


Fig. 12.

Dans les conditions ordinaires, au moment de la charge de l'une des boules l'influence sur la boule voisine produit un mouvement de la feuille d'or de l'électroscope, ou un déplacement de l'aiguille de l'électromètre et le phénomène s'arrête là. Si l'on vient alors à approcher des deux boules le disque d'uranium en communication avec le sol, on voit l'électroscope accuser un débit continu d'électricité au travers de l'air rendu conducteur. Si la boule B est d'abord au potentiel zéro, et si on l'isole, on la voit se charger progressivement.

Ces expériences réussissent très bien avec de faibles potentiels comme avec des potentiels très forts. Dans ce dernier cas il faut se mettre à l'abri de la déperdition par le mouvement des poussières électrisées autour de l'appareil.

J'ai réalisé encore l'expérience suivante en remplaçant l'une des deux boules de l'expérience précédente par la petite sphère d'uranium, de $13^{mm},70$ de diamètre. Celle-ci était posée sur un anneau maintenu par une mince tige de cuivre scellée dans un bloc de paraffine (fig. 13); ce dernier étant entouré d'une enveloppe de cuivre mise à la terre. Au-dessus de la petite sphère d'uranium on avait disposé une boule de cuivre de $15^{mm},50$ de diamètre, isolée et mobile au moyen d'une vis micrométrique de façon à pouvoir être amenée, soit au contact, soit à une distance déterminée de la sphère d'uranium.

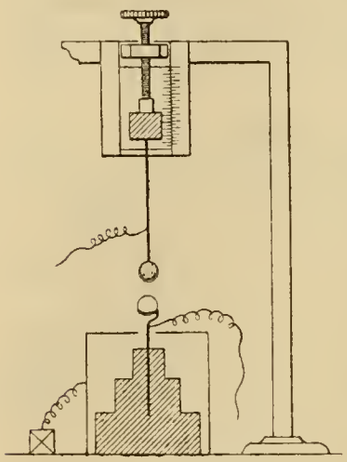


Fig. 13.

La sphère d'uranium était en relation avec la feuille d'or d'un électromètre à piles sèches, et la boule de cuivre avec un fil qui pouvait être mis soit à la terre, soit en contact avec l'un des pôles des divers éléments d'une pile zinc cuivre-eau, dont l'autre pôle était à la terre.

Dans ces conditions, si l'on met d'abord la sphère d'uranium au potentiel zéro, puis la boule de cuivre à un potentiel constant V et qu'on isole ensuite le système de la sphère d'uranium et de l'électromètre, on constate que, au lieu de rester à zéro, le potentiel du système augmente progressivement jusqu'à un maximum v proportionnel à V et variable avec la distance des deux boules. Si l'on charge alors le système à un potentiel supérieur à v, celui-ci baisse et retombe à la valeur v qui correspond à un état d'équilibre stable.

On a reconnu que les valeurs numériques étaient les mêmes lorsque la sphère de cuivre était chargée soit positivement soit négativement. Les nombres observés ont été les suivants :

Distances des boules. .	$0^{mm},5$	1^{mm}	2^{mm}	3^{mm}	4^{mm}	5^{mm}
Potentiels V. de la sphère inductrice volts.	Potentiels de la sphère d'uranium v					
5	$1^{v},6$	$1^{v},75$	»	»	»	»
10	3,2	3,6	»	»	»	»
15	4,9	»	»	»	»	»
20	6,4	6,5	»	»	»	»
25	7,8	»	»	»	»	»
30	»	9,3	»	»	»	»
40	12,4	12,2	»	»	»	»
50	16,2	16	15,7	15,1	14,6	13,7

Si l'on substitue à la sphère d'uranium une sphère de cuivre isolée, le potentiel que prend cette sphère, par influence, quand la distance des boules est de 1 millimètre, et pour $V = 50$ volts est $v = 3^{v},8$, environ le quart du potentiel que prend l'uranium dans les mêmes conditions.

Les nombres du tableau précédent correspondent à un état d'équilibre stable ; d'une part le courant venant de la boule de cuivre tend à porter la boule d'uranium au même potentiel, ou du moins à ne laisser subsister entre les deux conducteurs qu'une différence de potentiel de l'ordre des différences entre les métaux en contact ; et, d'autre part, la sphère d'uranium chargée perd sa charge par une partie de sa surface. Dans le champ non uniforme créé entre les deux sphères, la sphère d'uranium gagne des charges par les régions de sa surface pour lesquelles la force est dirigée vers l'intérieur, et elle perd par les

régions pour lesquelles la force est dirigée vers l'extérieur. Lorsque l'apport est égal au débit, l'équilibre s'établit d'une manière stable.

L'électrisation des masses métalliques d'uranium isolées placées dans un champ électrique est de nature à modifier continuellement le champ électrique qui les environne. Dans les expériences relatives à la décharge de l'électroscope à feuilles d'or par le disque d'uranium, si ce dernier est isolé, il se charge pendant que l'électroscope se décharge. Aussi, pour des expériences précises, convient-il, dans ce cas, de maintenir toujours les masses d'uranium soit en communication avec la terre, soit à un potentiel constant. L'expérience précédente n'offre pas une disposition se prêtant à un calcul simple. On peut constater, au contraire très simplement, qu'une sphère d'uranium non chargée introduite dans un long cylindre électrisé prend le potentiel de ce cylindre (fig. 14). J'ai vérifié avec une grande précision ce résultat le 2 mai 1897.

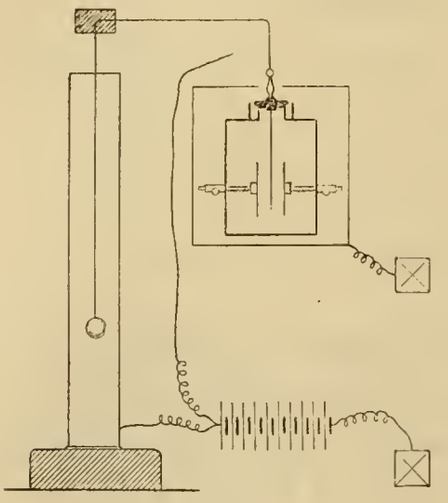


Fig. 14.

TABLEAUX ANNEXES DU CHAPITRE III

SPHÈRE D'URANIUM DANS DIVERS GAZ ET A DIVERSES PRESSIONS

16 FÉVRIER 1897.	AIR ATMOSPHÉRIQUE.						
	DIVISIONS.	V	PRESSION H = 18mm.		PRESSION H = 760mm.		RAPPORT.
			t	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$	t	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$	
		volts	sec.		sec.		
Sphère d'uranium dans une petite cloche.	50	16v,5	0	»	0	»	»
	40	13v,1	140	0,02428	21,5	0,1581	0,1535

28 FÉVRIER 1897.			PRESSION H = 13mm.		PRESSION H = 761mm.		
			t	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$	t	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$	
		volts	sec.		sec.		
Sphère d'uranium et lamelle de ulfate double dans la petite cloche.	50	16v,3	0	»	0	»	»
	40	13v,1	111	0,0273	13	0,2461	0,1109

3 MARS 1897.	DIVISIONS.	V	ΔV	AIR RARÉFIÉ. H = 0mm,0145		AIR H = 750mm		AIR ATMOSPHÉRIQUE déperdition de l'apparoil sans la boule d'uranium.	
				t	$\frac{dV}{dt}$	t	$\frac{dV}{dt}$	t	$\frac{dV}{dt}$
		volts.		sec.		sec.		sec.	
Expériences relatives à la sphère d'uranium dans l'ampoule de verre. . . .	50	14,52	»	»	»	0	»	»	»
	48	14	0,52	0	»	»	»	0	»
	45	13,15	0,85	210	0,0040	10	0,137	420	0,0020
	40	11,78	1,37	810	0,0023	20	0,137	»	»
	30	9,00	2,77	»	»	40,5	0,135	»	»
	20	6,08	2,83	»	»	62,5	0,129	»	»
	10	3,04	2,84	»	»	87	0,116	»	»
	5	1,52	1,52	»	»	100,5	0,112	»	»

TABLEAUX ANNEXES DU CHAPITRE III

4 MARS 1897	DIVISIONS.	V	ΔV	t	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$
Déperdition	45 44	14c,090 13c,798	» 0c,292	0 sec. 180	» 0c,00162

DIVISIONS.	V	ΔV	AIR ATMOSPHÉRIQUE. θ = 11° H = 748mm,8.		HYDROGÈNE. H = 748mm.8 — 12c d'eau	
			t	Δt	t	Δt
			sec.		sec.	
50	15,55	»	0	»	0	»
45	14,09	1,46	12	12	28	28
40	12,63	1,46	22,5	10,5	55	27
35	11,16	1,47	34	12,5	79,3	24,3
30	9,69	1,47	45,5	11,5	107	27,7
25	8,21	1,48	55,5	10	132,5	25,5
20	6,63	1,58	68,5	13	158,3	25,8
15	4,98	1,65	80,5	12	186,5	28,2
10	3,32	1.66	92.5	12	215,1	28,6
5	1,66	1,66	106,5	14	245,3	30,2

5 MARS 1897		V	ΔV	t	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$
Déperdition	46 47	14,148 13,864	» 0,284	0 sec. 180	0,0016

DIVISIONS.	V	ΔV	AIR. H = 747.6. θ = 10°,5.		ACIDE CARBONIQUE. 747.5 θ = 12°.5.	
			t	Δt	t	Δt
50	15,00	»	0	»	0	»
45	13.58	1.42	10,2	10,2	12,6	12.6
40	12.16	1,42	21,7	11.5	23,6	11,0
35	10.73	1,43	31,2	9,5	35,0	11.4
30	9,30	1,43	42,2	11,0	47,3	12,3
25	7,82	1,48	54,5	12,3	61.3	14.0
20	6,26	1,56	66,7	12,2	75,3	14.0
15	4,70	1,56	79,0	12,3	89,6	14,3
10	3.13	1,57	92,2	13,2	106.3	16,7
5	1,56	1,57	108,7	16.5	127.0	20.7

TABLEAUX ANNEXES DU CHAPITRE III

9 MARS 1897	DIVISIONS.	V	V	t	$\frac{\Delta v}{\Delta t}$
Déperdition	46 45	14,382 14,090	» 0.292	» 330 sec.	» 0v.00088

AIR. $\theta = 11.5$. H — 764.5.					ACIDE CARBONIQUE. $\theta = 14°5$. H — 764.6.				
DIVISIONS	V		t	Δt	DIVISIONS	V	ΔV	t	Δt
50	15.55	»	0	»	50	15,00	»	0	»
45	14.09	1.46	10,7	10.7	45	13.58	1,42	12.0	12,0
40	12,63	1,46	20.5	9,8	40	12,16	1,42	23.0	11.0
35	11.16	1.47	32.2	11.7	35	10,73	1,43	35.5	12.5
30	9.69	1,47	45.0	12.8	30	9,30	1,43	49,0	13.5
25	8,21	1,48	56.0	11.0	25	7.82	1,48	61.0	12,0
20	6,63	1.58	70.0	14.0	20	6,26	1.56	74.0	13,0
15	4.98	1,65	81.5	11.5	15	4,70	1,56	87.5	13.5
10	3.32	1.66	96.0	14.5	10	3.13	1.57	103.5	16.0
5	1.66	1.66	113.5	17.5	5	1.56	1,57	122,0	18.5

9 MARS 1897 AIR RARÉFIE $h = \frac{7}{481}$ $\theta = 13°$

DIVISIONS.	V	ΔV	t	Δt	DIVISIONS.	V	ΔV	t	Δt
48	14.558	»	0 sec	»	22	6v,952	»	0 sec	»
47	14.272	0.286	112.5	112.5	21	6v,636	0.316	235	235
46	13.986	0.286	230,0	117,5	20	6v.320	0.316	500	265
45	13.700	0,286	350,0	120,0	»	»	»	»	»

10 MARS 1897			H = 763.6 θ = 11°2 ACIDE CARBONIQUE. t	Δt	AIR. t	Δt
50	»	14.70	0	»	0	»
45	1.40	13.31	10.8	10,8	9.5	9,5
40	1.40	11.91	21.4	10,6	20	10.5
35	1.40	10.51	33.0	11.6	30.7	10.7
30	1.40	9.11	45.0	12	43	11.3
25	1.46	7,65	57.2	12.2	54.5	11.5
20	1.53	6.12	71.3	14.1	67.5	13.0
15	1.53	4.59	84.6	13.3	79.0	11.5
10	1.53	3.06	99.4	14.8	93.0	14
5	1.53	1.53	120.6	21.2	108	15

Avec l'électroscope n° 1 air raréfié. $h = \frac{6}{681}$.
Forts potentiels.

z	V	ΔV
95°5	1124	»
95°	1042.5	81.5

Pour 95°25 on observe une chute de
$0°15 = 40^{v}75$ en $4^{m}\text{-}^{s} = 240^{sec}$

$$\frac{40.75}{240} = 0,170.$$

TABLEAUX ANNEXES DU CHAPITRE III

SÉRIES DU 11 MARS 1897 — ENSEMBLE DES DEUX ÉLECTROSCOPES — POTENTIELS FAIBLES

	DIVISIONS	V	ΔV	t	Δt	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$
Déperdition de l'électroscope n° 2	45	13,58	»	0	»	
	44	13,39	0,284	150	150	
	43	13,01	»	340	190	0,00167
	24	7,508	»	0	»	
	23	7,196	0,312	270	270	0,00155

DIVISIONS.	V	ΔV	AIR 762,5 θ = 14°2.		HYDROGÈNE SEC. H = 762,5 θ = 1.3°	
			t	Δt	t	Δt
50	15v	»	0	»	0	»
45	13,58	1,42	10,2	10,2	26	26
40	12.16	1.42	20,2	10	51	25
35	10,73	1,43	31	10,8	76,7	25,7
30	9,30	1,43	41,5	10,5	103,5	26,8
25	7,82	1,48	53	11,5	130	26,5
20	6,26	1,56	65,5	12,5	156,9	26,9
15	4,70	1,56	77	11,5	184,2	27,3
10	3,13	1,57	91,5	14,5	213,3	29,1
5	1,56	1,57	108	16,5	245,7	32,4

FORTS POTENTIELS.		α	V	ΔV	t	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$
11 MARS 1897			v		sec.	
Déperdition de l'électroscope n° 1.	100	20°	1801,8	»	0	»
	99,5	19°	1730,3	71v.5	360	0.1986

	α	V	ΔV	AIR SEC H = 763,2 θ = 13°,7.			HYDROGÈNE SEC		
				t	Δt		t	Δt	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$
100	20	1801,8	»	0	»	»	0	0	»
99,5	19	1730,3	71,5	102,5	102,5	»	195	195	»
99	18	1658,2	72,1	205	102,5	0,700	590	195	0,368
							Perte de l'électroscope.		
96	12	1204,0	78,7	0	»	»	0	»	»
95,5	11	1124,0	80	140	140	»	285	285	»
95	10	1042,5	81,5	260	120	0,672	540	255	0,305
94,5	9	958,8	83,7	365	102	»			
92,5	5	590,6	»	0	»	»	»	»	»
92	4	486,2	104,4	147	147	0,710	»	»	»
91	2	375,4	110,8	285	138	0,800	»	»	«

TABLEAUX ANNEXES DU CHAPITRE III

19 MARS 1897.			AIR $\theta = 19°,4$ $H = 760.8$ Moyennes des séries au commencement et à la fin des expériences de ce jour.		AIR RARÉFIÉ $h = 68,5$ $\theta = 19°$	
DIVISIONS.	V	ΔV	t	Δt	t	Δt
50	13,96	»	0	»	0	»
45	12,64	1,32	8,50	8,50	36,5	36,5
40	11,32	1,32	17,75	9,25	87,3	40,8
35	10,00	1,32	27,25	9,50	136,2	48,9
30	8,66	1,34	37,50	10,25	192,0	55,8
25	7,29	1,37	48,25	10,75	250,5	58,5
20	5,84	1,45	58,0	9,75	308,5	58,0
15	4,38	1,46	68,25	10,25	369,0	60,5
10	2,92	1,46	79,25	11,0	433,8	64.0
5	1,46	1,46	92,0	12,75	497,5	64,5

Déperdition de l'électromètre, insensible.

20 mars 1897. $\theta = 15°$.

	AIR $h = 764,5$				AIR RARÉFIÉ $h = 362,5$			
	V	ΔV	t	Δt	V	ΔV	t	Δt
			sec.				sec.	
50	14,70	»	0	»	14,39	»	0	»
45	13,31	1,39	9,12	9,12	13,03	1,36	12,5	12,5
40	11,91	1,40	18,8	9,70	11,67	1,36	25,75	13,2
35	10,51	1,40	28,75	9,95	10,31	1,36	39,50	13,75
30	9,11	1,40	38,70	9,95	8,93	1,38	54,0	14,5
25	7,65	1,46	49,10	10,30	7,51	1,42	67,5	13,5
20	6,12	1,53	60,30	11,20	6,01	1,50	82,5	15,0
15	4,59	1,53	71,10	10,80	4,51	1,50	97,0	14,5
10	3,06	1,53	82,30	11,20	3,01	1,50	112,2	15,2
5	1,53	1,53	95.5	13.20	1,51	1,50	118,7	14,5

TABLEAUX ANNEXES DU CHAPITRE III

28 mars 1897

AIR A DIVERSES PRESSIONS

Température θ = 17°5			H = 745,4		H = 545,7		H = 745,4		H = 334mm,15		H = 94mm,2		H = 111mm,8		H = 745,4	
div	V	ΔV	*t*	Δ*t*	*t*	Δ*t*	*t*	Δ*t*	*t*	Δ*t*	*t*	Δ*t*	*t*	Δ*t*	*t*	Δ*t*
			sec.		sec.		sec.		sec.		sec.		sec.		sec.	
50	15,55	»	0	»	0	»	0	»	0	»	0	»	0	»	0	»
45	14,09	1,46	8	8	8	8	8,5	8,5	11,1	11,1	22	22	18,5	18,5	8	8
40	12,63	1,46	16,7	8,7	16,7	8,7	17,2	8,7	22,2	11,1	46	24	41	22,5	17	9
35	11,16	1,47	27	10,3	27,2	10,5	27,2	10	34,5	11,3	74	28	67	26	27	10
30	9,69	1,47	36,5	9,5	37,5	10,3	38,7	11,5	48,7	14,2	115	41	102,5	35,5	37	10
25	8,21	1,48	48,5	12	48,7	11,2	51	12,3	63	14,3	152	38	138,5	36	46	9
20	6,63	1,58	59,7	11,2	61	12,3	»	»	77,6	14,6	198	46	179	40,5	57,5	11,5
15	4,98	1,65	72,2	12,5	74	13	»	»	94,7	14,1	244	46	217	38	72	14,5
10	3,32	1,66	89	16,8	90	16	»	»	113,6	18,9	289	45	260	43	»	»
5	1,66	1,66	119	30	122	32	»	»	143,8	29,7	335	46	310,5	50,5	»	»

§ 7. — *Vérifications, extension et interprétation des résultats précédents. — Expériences de M. E. Rutherford.*

Les expériences décrites dans les chapitres précédents ont été répétées et étendues par divers observateurs. En 1897 Lord Kelvin (1) montra qu'on obtient un courant continu en plaçant un morceau d'uranium entre deux plaques, l'une de zinc et l'autre de cuivre, reliées par un fil, puis avec MM. Beattie et S. de Smolan, il réalisa diverses expériences sur l'équilibre électrique entre l'uranium et un métal isolé placé dans le voisinage. Si l'air, entre deux plateaux métalliques différents, est traversé par le rayonnement de l'uranium, il s'établit entre les plateaux la même différence de potentiel que si on les réunit par une goutte d'eau. M. E. Villari (2) vérifia également quelques-unes des propriétés que j'avais observées, et il reconnut que le voisinage d'un fil chargé détruisait la propriété conductrice de l'air influencé par l'uranium, comme cela se produit pour l'air modifié par les rayons X.

Le travail le plus complet qui parut ensuite sur les propriétés du rayonnement de l'uranium est dû à M. Rutherford. En 1899, trois ans après mes premières publications, M. Rutherford (3) reprit méthodiquement, un à un, la plupart des points que j'avais signalés, et leur appliqua des me-

---

(1) *Phil. Mag.* t. XLV, p. 277, 1898, et *ibid.*, t. XLVI, p. 82.
(2) *Rend. della R. Acad. delle Scienze fisiche matematische*, Napoli, 1897.
(3) *Phil. Mag.*, n° 284, p. 109, janvier 1899.

sures. Ce travail fut exécuté dans le laboratoire Cavendish de Cambridge, où M. J.-J. Thomson étudiait alors avec tant de succès l'action produite sur les gaz par les rayons nouveaux, et développait l'hypothèse de l'ionisation. L'application de cette hypothèse à l'interprétation des phénomènes produits par le rayonnement de l'uranium fut particulièrement féconde et constitua un progrès important dans la question qui nous occupe.

Les ions, multiples ou sous-multiples de l'atome, transportant des charges positives ou négatives, tendent à se recombiner entre eux. Dans un champ électrique uniforme, ils sont animés de vitesses constantes, différentes pour les ions positifs et les ions négatifs. Le nombre d'ions libérés par seconde est considéré comme proportionnel à l'intensité de la radiation active et à la pression du gaz.

Il résulte de cette hypothèse que si une masse de gaz ionisé est comprise entre deux plateaux maintenus à des potentiels différents, il s'établira entre les plateaux un courant produit par les ions qui viennent se fixer sur les plateaux dont la charge est de signe contraire à la leur, et sur lesquels ils se déchargent. Ce courant doit augmenter avec le nombre des ions libérés, c'est-à-dire avec l'intensité du rayonnement absorbé par le gaz, et le courant atteint un maximum lorsque tous les ions libérés sont recueillis sur les plateaux avant d'avoir eu le temps de se recombiner. Si les vitesses des ions positifs et négatifs sont inégales le gaz doit être chargé, et la présence des charges doit produire une perturbation dans le champ électrique.

M. Rutherford, après avoir appliqué la méthode photo-

graphique à la vérification de l'absence de réfraction et de polarisation de rayons de l'uranium, s'est exclusivement servi de la méthode électrique.

Une couche d'oxyde d'uranium ou d'un sel de ce métal était étalée sur un disque de zinc de 20 centimètres carrés de surface. Au-dessus, à 4 centimètres de distance se trouvait un second plateau de zinc parallèle au premier, isolé et relié à un électromètre. Le plateau inférieur était maintenu au potentiel de 50 volts. On couvrait la surface de l'uranium avec un nombre progressivement croissant de feuilles métalliques très minces, puis on recouvrait le tout d'une feuille de plomb percée d'une ouverture de surface déterminée. M. Rutherford reconnut que la variation du courant pour chaque feuille interposée, d'abord constante pour les premières feuilles, diminue à mesure que l'épaisseur totale traversée augmente; il en conclut, comme je l'avais reconnu antérieurement, que le rayonnement est hétérogène. M. Rutherford interprète ses expériences en considérant dans le rayonnement deux parties : l'une α, de beaucoup la plus intense, mais très absorbable; l'autre β, beaucoup plus faible, mais très pénétrante; il suppose aussi que la radiation β est à peu près homogène.

Nous verrons plus loin que le phénomène n'est pas aussi simple, que la radiation pénétrante est complexe et que les intensités mesurées se rapportent à l'intensité de l'absorption par les gaz. Elles donnent des valeurs relatives des intensités d'une même radiation, mais ne permettent pas de comparer les intensités vraies de deux radiations inégalement absorbables. Les radiations d'égale intensité apparaissent comme d'autant plus faibles qu'elles

sont plus pénétrantes. Les conclusions formulées par M. Rutherford ne doivent donc pas être considérées comme absolues.

Cependant M. Rutherford a reconnu que tous les sels d'uranium émettent les mêmes types de radiations absorbables et pénétrantes. L'auteur fait en outre l'hypothèse que le type α est une radiation secondaire excitée par la radiation β. Nous aurons plus loin à discuter cette question.

Dans le but d'étudier l'absorption du rayonnement par divers gaz, M. Rutherford a rendu solidaires les deux plateaux entre lesquels il mesure le courant. Le plateau inférieur est percé d'une large ouverture recouverte d'une feuille très mince d'aluminium.

Les rayons actifs traversent cette feuille d'aluminium et viennent ioniser l'air entre les deux plateaux dont la distance est constante. L'ensemble peut se déplacer parallèlement à lui-même pour se rapprocher ou s'éloigner de la source radiante qui est, comme ci-dessus, une couche d'oxyde d'uranium.

Le courant décroît à mesure que l'on éloigne de la source la plaque inférieure du condensateur mobile. En supposant que l'absorption suive la loi exponentielle ordinaire $I = I_0 e^{-\lambda x}$ x étant l'épaisseur du milieu absorbant, on rend compte des expériences et l'on peut calculer les coefficients λ pour divers gaz. L'absorption est proportionnelle à la pression, mais pour obtenir ce résultat il faut recueillir tous les ions produits, c'est-à-dire opérer avec une différence de potentiel suffisante pour observer toujours le courant de saturation. La valeur de λ est la plus petite

pour l'hydrogène et plus grande pour l'acide carbonique.

Dans ces expériences et dans les conclusions qui en ont été déduites on n'a pas tenu compte de l'hétérogénéité du faisceau des radiations émises.

Pour une même distance des plaques, si on raréfie l'air progressivement, l'absorption diminue d'abord plus vite que le nombre des ions et le courant augmente jusqu'à un maximum : puis le courant diminue ensuite jusqu'à s'annuler pour une pression très faible. Si la différence de potentiel est suffisante et l'absorption complète le courant est proportionnel au nombre total des ions produits. Avec une sphère recouverte d'oxyde d'uranium suspendue au milieu d'un volume gazeux, on trouve que l'ionisation totale est la même pour tous les gaz étudiés.

Si dans l'appareil précédent on écarte progressivement les plaques, on constate que la totalité de la masse d'air ionisée intervient; le courant de saturation augmente avec la distance jusqu'à une certaine limite.

M. Rutherford a ensuite repris, en les modifiant, les expériences relatives à l'entraînement de l'air rendu conducteur par les rayons de l'uranium. En mesurant la vitesse des courants gazeux on peut déterminer la durée pendant laquelle persiste la modification résultant de l'absorption des nouveaux rayons, et estimer la loi de la disparition de cette modification avec le temps; dans l'hypothèse de l'ionisation on dira qu'on détermine la loi de recombinaison des ions.

En supposant que la vitesse de recombinaison soit, à chaque instant, proportionnelle au carré du nombre des ions libres à ce moment, on obtient des valeurs théoriques

qui sont d'accord avec les valeurs numériques observées.

Les vitesses dont les ions sont animés dans un champ électrique peuvent se mesurer en faisant passer un courant d'air de vitesse connue dans l'espace annulaire compris entre deux cylindres concentriques, dont l'un est au potentiel V, et l'autre la terre; on évalue la diminution du courant par rapport au courant observé quand l'air est au repos, le champ étant normal au courant d'air et, par suite, les vitesses des ions ayant la même direction.

On a comparé ainsi les vitesses dues à l'ionisation produite par les rayons de l'uranium et par les rayons X. Dans le premier cas le cylindre extérieur était enduit intérieurement d'une couche d'oxyde d'uranium; dans le second cas on avait substitué à ce cylindre un cylindre en aluminium, et un faisceau de rayons X était projeté sur le cylindre, normalement aux génératrices, de façon à atteindre le cylindre central et à ioniser l'air dans l'espace annulaire. Les vitesses des ions, ou plutôt les réductions du courant électrique par le courant d'air, ont été trouvées les mêmes dans les deux cas. La vitesse des ions négatifs est plus grande que celle des positifs.

Lorsque l'on considère le champ électrique entre deux plateaux parallèles dont l'un est recouvert d'uranium, on peut prévoir, d'une part, qu'en raison de l'absorption, l'ionisation sera plus forte près de la couche d'uranium que près de l'autre plateau, et, d'autre part, qu'en raison de l'inégalité des vitesses des ions positifs et négatifs, le gaz doit rester chargé positivement et créer une dissymétrie dans le champ. Au lieu d'être constant, le gradient doit être variable. On a mesuré cette variation entre deux plateaux dis-

tants de 51 millimètres en produisant un écoulement d'eau à diverses distances des plateaux. Ceux-ci étaient en relation avec les deux pôles d'une pile dont le milieu était à la terre. Si les deux plateaux sont du même métal, le plan médian est au potentiel zéro. Si l'on remplace l'un des plateaux par une couche d'oxyde d'uranium, le zéro s'éloigne de l'uranium, d'autant moins que le potentiel est plus fort; le déplacement est plus grand si l'uranium est chargé positivement. Dans l'expérience à laquelle il est fait allusion ici, pour 16, 8 et 4 volts, les distances du zéro à l'uranium ont été 28^{mm}, 30^{mm}, et 33^{mm}. La courbe représentative des potentiels, qui est une droite s'il n'y a pas d'uranium, se transforme en une courbe sans inflexion. La variation du gradient est augmentée près de l'uranium et diminuée près de l'autre plateau.

M. Rutherford a cherché également une relation entre la valeur du courant dans le gaz ionisé par le rayonnement de l'uranium et la force du champ électrique. Dans une première série relative à l'air, il avait disposé deux plateaux parallèles : l'un A, couvert d'oxyde d'uranium sur une surface de 14 centimètres carrés est en relation avec le pôle d'une pile, l'autre B, placé au-dessus, se charge, mais on le maintient au potentiel zéro en le reliant par l'intermédiaire d'une résistance liquide (xylol) à un point d'un circuit dont on peut faire varier le potentiel. On a ainsi mesuré le courant, dans l'air, pour des potentiels de l'uranium variant entre 0 et 300 volts. Dans une autre série, on avait substitué aux deux plateaux deux cylindres concentriques de $4^{c},5$ et $3^{c},75$ de diamètre; le cylindre intérieur était recouvert d'oxyde d'uranium. Dans l'espace annu-

laire on pouvait introduire divers gaz à diverses pressions. Les nombres obtenus pour les plus grandes forces électromotrices avec l'hydrogène, l'air, l'acide carbonique, 185, 630, et 820, ou encore 0,29, 1, et 1,30 ne correspondent pas encore à la saturation complète. En diminuant la pression, la saturation est plus vite atteinte. Le nombre 0,29 diffère peu de la valeur 0,23 que j'avais obtenue pour l'hydrogène avec les forts potentiels et une saturation plus complète.

Enfin M. Rutherford a constaté, ainsi que je l'avais fait également, que le gaz qui passe au-dessus de l'uranium chargé prend une charge de même signe, puis qu'il se décharge en passant au travers de toiles métalliques fines, comme cela se produit pour les gaz soumis à l'action des rayons X.

En résumé, on voit que le travail de M. Rutherford, très méthodiquement dirigé, a vérifié et étendu les conclusions auxquelles j'avais été conduit. Le grand progrès qui en résulta fut l'identification des effets produits dans les gaz par le rayonnement de l'uranium, avec les effets d'ionisation produits par d'autres rayonnements, et l'application de la théorie de l'ionisation aux phénomènes de conductibilité qui en résultent.

Je dois rappeler toutefois que ce travail est postérieur de deux ans aux mesures que j'avais publiées sur la même question.

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE IV

GÉNÉRALISATION DES PROPRIÉTÉS DE L'URANIUM. RECHERCHES PHYSIQUES AVEC LES PREMIÈRES PRÉPARATIONS RADIOACTIVES

(1897-1898-1899)

§ 1. — *Nouvelles substances actives.*

La faible intensité du rayonnement de l'uranium est la cause pour laquelle les phénomènes dont il vient d'être question sont restés si longtemps ignorés. Dès que mes premières expériences les eurent mis en évidence, il ne me sembla pas douteux que ces propriétés de l'uranium ne devaient pas être l'apanage exclusif de ce métal et qu'elles devaient se manifester à des degrés différents dans d'autres corps de la nature. Mais comme le rayonnement nouveau venait d'être reconnu avec l'uranium, il ne semblait pas probable, *a priori*, que l'activité des autres corps connus dût être notablement plus grande, et la

recherche de la généralité du phénomène nouveau me parut alors moins urgente que l'étude physique de sa nature.

La voie dans laquelle j'avais concentré mes recherches, ne devait pas être, à cette époque la plus féconde pour les progrès de la question.

D'autres expérimentateurs recherchèrent si d'autres corps présentaient des propriétés analogues à celles des composés de l'uranium. En 1898, M. Schmidt (1) trouva que les composés du thorium constituaient un autre groupe de composés actifs dont l'intensité était du même ordre que celle du groupe de l'uranium. Presque en même temps (12 avril 1898) Mme Curie (2) reconnut indépendamment de M. Schmidt l'activité du thorium. Mme Curie mesurait l'intensité du rayonnement par le courant transmis au travers de l'air ionisé, comme je l'avais fait pour l'uranium, mais en appliquant à la détermination de ce courant une méthode de mesure absolue indiquée antérieurement par M. Curie à la suite de ses recherches sur la piezo-électricité. Divers composés de presque tous les corps simples alors connus furent examinés dans ce travail, et Mme Curie reconnut d'abord que tous les corps qui se montrèrent actifs contenaient, soit de l'uranium, soit du thorium. Les valeurs numériques trouvées pour l'activité relative de l'uranium et du sulfate double d'uranyle et de potassium sont, du reste, presque identiques à celles que j'avais obtenues en 1896.

---

(1) Wiedemann. *Annalen*, t. LXV, p. 141.

(2) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXVI, p. 1101

Le nombre $2,3.10^{-11}$ ampères donné par Mme Curie pour l'uranium est pratiquement identique à celui que j'ai indiqué plus haut, comme se déduisant de mes expériences avec une sphère d'uranium poli.

Le nombre de Mme Curie est relatif à une surface granuleuse de 50 centimètres carrés ($50^{cq},26$). Si l'on tient compte de ce fait qu'une surface formée de plusieurs couches de sphères égales est égale à celle de sa projection multipliée par $\left(1 + \frac{\pi}{4}\right) = 1,785$, on reconnaît l'identité des deux valeurs.

$$\frac{2,3\ 10^{-11}}{50,26 \times 1,785} = 2,5.10^{-13}$$

tandis que le nombre donné p. 82 est $2,6.10^{-13}$.

Mme Curie vérifia en outre qu'après plusieurs traitements successifs les sels d'uranium, ramenés au même état, présentaient la même activité, et donna ainsi une démonstration nouvelle et plus complète de ce fait, que l'activité se présente comme une propriété atomique. Au début de mes recherches, en 1896 (1) j'avais considéré ce fait comme établi par la constatation de l'activité de *tous* les composés contenant l'élément uranium quelle que fût leur provenance.

Ce point de vue, poursuivi dans ses conséquences chimiques devait être remarquablement fécond. M. et Mme Curie avaient constaté que certains minéraux d'uranium, des échantillons de chalcolite naturelle et divers

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXII, p. 1086 (18 mai 1896).

échantillons de pechblende de provenances variées étaient notablement plus actifs que l'uranium métallique, puis, d'autre part, que la chalcolite artificielle était moins active que l'uranium métallique et semblable aux autres sels de ce métal; ils en conclurent que l'activité exceptionnelle de ces corps pouvait être due à la présence dans les minéraux de corps actifs encore inconnus, et ils entreprirent de les rechercher.

Toute propriété intimement liée à l'atome d'un corps et se révélant avec une intensité exceptionnelle peut servir à rechercher la présence de ce corps. C'est ainsi que si l'on ne connaissait pas d'autre réactif du fer, ses propriétés magnétiques à la température ordinaire permettraient d'en déceler la présence même dans des sels; les différences dans les propriétés magnétiques permettraient aussi d'établir des distinctions entre les métaux très magnétiques, fer, nickel, cobalt, de sorte que le caractère magnétique pourrait constituer une méthode d'investigation, à défaut d'une autre meilleure.

On sait d'autre part que l'analyse spectroscopique de la lumière émise par les vapeurs incandescentes et l'absorption de la lumière ont fourni des méthodes d'analyse chimique particulièrement délicates.

L'activité radiante de l'uranium, que M. Curie a appelée, pour abréger, la radioactivité, a constitué un caractère nouveau capable aussi de s'appliquer à une méthode d'analyse chimique, et cette application est l'œuvre de M. et Mme Curie.

J'avais indiqué, deux ans auparavant, les deux propriétés fondamentales de la radioactivité, l'action chi-

mique sur les sels d'argent, révélée par la plaque photographique, et la conductibilité communiquée aux gaz. Les indications des deux méthodes fondées sur ces deux propriétés ne sont pas équivalentes. Si le rayonnement étudié est complexe, l'action sur les sels d'argent et l'ionisation de l'air peuvent ne pas être produites avec les mêmes intensités relatives par les mêmes rayons; les deux méthodes doivent se compléter mutuellement. Celles-ci ont du reste chacune leurs avantages. La plaque photographique accumule lentement les impressions de rayonnements extrêmement faibles, et donne des images avec des détails très délicats; l'électromètre donne des indications rapides, fournit des valeurs numériques, mais ne permet pas certaines analyses délicates d'un faisceau de rayons actifs.

M. et Mme Curie se sont presque exclusivement servis de la méthode électrique: guidés par l'idée que la radioactivité était une propriété atomique, idée que la connaissance anticipée des diverses manifestations de la radioactivité aujourd'hui connues eût peut-être troublée, ils ont eu le rare bonheur de voir leur tentative dans la recherche de corps nouveaux couronnée de succès.

Il n'entre pas dans le cadre de ce mémoire, qui ne contient en principe que mes recherches personnelles, de développer ici le beau travail de M. et Mme Curie.

Cependant, comme la suite de mes recherches a été intimement liée aux observations faites avec les préparations de plus en plus actives dont M. et Mme Curie ont eu l'obligeance de me remettre de petites quantités, je dois résumer brièvement les résultats de leurs premiers travaux.

Parmi les corps les plus actifs compris dans l'étude faite par Mme Curie, se trouvait la pechblende de Joachimsthal. M. et Mme Curie entreprirent de traiter ce minerai et d'en extraire un produit plus actif que l'uranium. Le 18 juillet 1898 M. et Mme Curie (1) annonçaient à l'Académie des Sciences la préparation d'un produit intimement associé au bismuth, et 400 fois plus actif que l'uranium, à surface égale, pour ioniser l'air. Ce produit fut appelé le *polonium*.

Le 26 décembre de la même année, M. et Mme Curie (2), avec la collaboration de M. Bémont, décrivirent la préparation d'un autre produit retiré de la pechblende et accompagnant dans ses réactions chimiques le baryum. Par des fractionnements successifs ils avaient réussi à préparer un produit 900 fois plus actif que l'uranium, dont le poids atomique était plus grand que celui du baryum, qui dans le spectre de l'étincelle faisait apparaître des raies caractéristiques nouvelles reconnues par M. Demarçay, et dont le rayonnement était assez intense pour provoquer la phosphorescence du platinocyanure de baryum. Le corps nouveau ainsi caractérisé reçut le nom de *radium*. Ce corps se trouve en très petite quantité dans le minerai. On a pu extraire de plusieurs tonnes de résidus de minerai d'urane quelques décigrammes de produits extrêmement actifs. A ces corps on doit en ajouter un troisième, préparé par M. Debierne, qui accompagne dans ses réactions le thorium dont il n'a pu être séparé. Nous reviendrons plus loin

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXVII, p. 175.
(2) *Id.*, t. CXXVII, p. 1215.

sur ces corps dont un seul, le radium, a pu être isolé à l'état de sel pur.

On doit mentionner, en outre, qu'à la même époque M. Giesel, à Brunswick, recherchait la préparation de produits actifs; les premiers produits obtenus par M. Giesel et décrits postérieurement aux publications de M. et Mme Curie étaient du bismuth à polonium, et du baryum radifère; on verra plus loin que ces préparations présentaient des différences avec celles de M. et Mme Curie.

Plus tard (1), M. Giesel a obtenu un produit actif uni au plomb, mais qui n'a pas encore été caractérisé.

§ 2. — *Recherches physiques sur le rayonnement de l'uranium et des nouvelles substances radioactives.*

J'ai cité à la fin du chapitre Ier, § 2, diverses expériences relatives à la réflexion diffuse des rayons de l'uranium, effets dus, comme je l'ai démontré plus tard, à un rayonnement secondaire émis par les corps frappés. Je continuais ces recherches rendues difficiles par la faiblesse du rayonnement mais qui toutes concordaient pour montrer l'absence de réflexion régulière et je terminais d'autres travaux, lorsque la première publication de Mme Curie me conduisit à faire quelques essais photographiques avec la pechblende, et avec l'orangite (silicate hydraté de thorium); l'une de ces épreuves montrant des impressions dues à l'uranium, à l'orangite et à la pechblende de Georgenwagsfort, est reproduite (Pl. IV, fig. 15) (avril 1898).

---

(1) *Berichte der Deutschen chemischen Gesellschaft*, 33, 3569. 1901.

Le 5 janvier 1899 M. Curie eut l'obligeance de me remettre quelques centigrammes d'un sulfure de bismuth et de polonium, d'activité 900, et de carbonate de baryum radifère d'activité 1200. Ces corps furent disposés aussitôt dans de petits cylindres de papier de 7 millimètres environ de diamètre, fermés en dessus par un bouchon, et en dessous soit par une très mince lame de mica, soit par une feuille d'aluminium battu; dans des cylindres exactement semblables fermés par des lames de mica ou d'aluminium identiques, on mit un peu de poudre d'uranium, et les petits cylindres furent placés à même sur la gélatine d'une plaque photographique, le 7 janvier 1899; après 50 minutes de pose on a développé la plaque qui a donné l'épreuve de la figure 19, Pl. IV.

On doit remarquer que dans l'impression du radium au travers du mica, la lumière due à une phosphorescence du carbonate de radium, et dont il est question plus loin, a dû intervenir, mais l'impression obtenue au travers de l'aluminium mince avec le même carbonate de radium montre que dans ce cas particulier l'effet lumineux a été négligeable.

Cette épreuve a immédiatement mis en évidence un fait important. Les impressions dues au polonium sont limitées nettement à la projection des cylindres de papier, montrant que le rayonnement de ce corps a été complètement absorbé par les parois latérales. Le rayonnement du polonium traverse très bien une feuille très mince d'aluminium, plus difficilement une très mince lamelle de mica; l'épreuve montre qu'il ne traverse pas une feuille de papier, et d'autres épreuves ont fait voir qu'il ne traversait pas une lamelle de verre de $0^{mm},1$ d'épaisseur, ou, du moins, que

la durée de la pose était trop courte pour révéler une action au travers de ces corps. L'impression obtenue sur la plaque ci-dessus avec l'uranium est extrêmement faible.

Si l'on interpose entre ces corps actifs et la plaque photographique une lame d'aluminium de 2 millimètres d'épaisseur, par exemple en enfermant la plaque sensible dans le châssis décrit pages 11 et 42 et représenté figure 7, Pl. II, les impressions sont plus faibles au bout du même temps; mais si on prolonge la pose pendant deux jours, on obtient l'épreuve représentée figure 20, Pl. IV, dans laquelle à côté de la très forte impression produite par le radium, on reconnaît que l'impression due au polonium est plus faible que celle qui est donnée par l'uranium. Ainsi l'absorption produite par une épaisseur de 2 millimètres d'aluminium, est bien plus considérable sur les rayons du polonium que sur ceux de l'uranium et du radium.

A cette époque les phénomènes d'absorption étaient les seuls que l'on connaissait pour caractériser des rayonnements de nature différente et cette expérience venait établir une différence profonde entre les rayonnements émis par les deux corps très actifs découverts par M. et Mme Curie. On verra plus loin comment cette différence a été précisée et comment on a démontré que les deux rayonnements étaient essentiellement différents.

On doit ajouter que si l'on prolonge la pose, le rayonnement du polonium donne une impression au travers du papier lorsque celui-ci est en contact avec la matière active et avec la gélatine de la plaque photographique, la fig. 18, Pl. IV montre ce phénomène sur lequel nous reviendrons plus tard.

§ 3. — *Recherches relatives à la réfraction des nouveaux rayons.*

J'ai profité de la grande intensité du rayonnement du radium pour répéter des expériences qui avaient été montées depuis longtemps avec l'uranium, mais que la faiblesse du rayonnement de ce dernier corps rendait difficiles ou incertaines.

J'ai déjà signalé au commencement de ce mémoire et surtout au chapitre II un fait observé constamment avec l'uranium, qui s'est reproduit avec le radium et le thorium et qui est le suivant : lorsque la substance active, enfermée ou non dans un tube de verre ou de papier, est placée sur une lamelle de verre, et que la lamelle est posée, soit directement sur la plaque photographique, soit sur celle-ci protégée contre le rayonnement lumineux par une feuille de papier noir ou une mince lame d'aluminium, ou encore quand la lamelle est maintenue à une petite distance de la plaque sans la toucher, on observe, en développant l'épreuve, que la silhouette de la lame de verre apparaît bordée à l'extérieur d'une bande blanche. Cette bande figure une ombre portée par les faces verticales de la lamelle; les parties où les ombres se croisent sont plus blanches que les autres; l'impression photographique est parfois très forte au delà de cette bande. Elle est d'autant plus large que la lame de verre est plus épaisse, que le rayonnement est plus incliné par rapport à la lame, ou que celle-ci est plus éloignée de la plaque sensible; la bande est alors notablement plus diffuse.

Tous ces caractères correspondent à une ombre portée; on les reproduit avec la lumière en plaçant sur la lamelle de verre un corps lumineux par phosphorescence, par exemple une préparation lumineuse de sulfure de calcium, et dans ce cas on constate que la lumière est réfractée par les bords de la lame et réfléchie totalement sur les faces verticales.

Il était naturel de penser que les phénomènes observés avec les nouveaux rayons au travers du papier noir ou de l'aluminium pouvaient être dus à des phénomènes de réflexion et de réfraction analogues, ainsi qu'il a été dit au chapitre II. Toutes les substances transparentes pour le rayonnement des corps radioactifs, lorsqu'elles sont en lames terminées par des faces verticales, ont donné le même effet; je citerai le mica, le soufre, la paraffine, le cuivre, le plomb, l'aluminium, le bord d'une feuille de papier noir ou d'une carte. On verra plus loin quelle autre explication on peut donner de ce phénomène qui constitue bien une ombre portée par un rayonnement rectiligne. J'ai déjà rappelé combien il m'avait troublé à l'origine de ces recherches, et, pour élucider définitivement la question de la réfraction, on disposa un très grand nombre d'expériences qui toutes ont montré que le rayonnement passe sans déviation au travers d'un prisme en verre, en quartz ou en aluminium. Parmi les nombreuses dispositions réalisées je citerai ici seulement les deux suivantes :

1° Deux petits prismes rectangles isocèles en verre, de 4 millimètres de hauteur, ont été fixés par leur face hypoténuse sur une lamelle de verre de manière à avoir une arête commune; ils reposaient ensuite sur une plaque pho-

tographique par l'arête de leur dièdre droit, leur face hypoténuse étant tournée vers le haut et horizontale. Au-dessus de l'arête commune et à 10 millimètres environ de la plaque de verre était disposé parallèlement à cette arête un petit tube de verre effilé très mince, de moins de 1 millimètre de diamètre, et rempli de carbonate de radium. La figure 22, Pl. V montre cette disposition. Dans ces conditions il est facile de constater que la lumière émise par la phosphorescence du carbonate de radium ne passe pas entre les deux prismes et est réfractée au travers des faces extérieures dont l'angle est de 45°. Si l'on arrête le rayonnement lumineux par une feuille de papier noir ou par une feuille d'aluminium, l'impression photographique montre que le rayonnement actif passe sans déviation au travers des faces des prismes avec une absorption progressive correspondant à l'épaisseur de la matière traversée. L'épreuve (fig. 25, Pl. V) dans laquelle la moitié seulement de l'impression a été protégée par une bande de papier noir, montre d'un côté le phénomène de la réfraction lumineuse superposé à l'effet des rayons pénétrants et de l'autre l'effet de ces derniers rayons. On voit encore sur cette épreuve de nombreux détails, ainsi que des bords blancs et des effets dus à des rayons secondaires.

Je rapporterai encore l'expérience suivante : au travers d'une lame de plomb de 3 à 4 millimètres d'épaisseur on a pratiqué une fente oblique par laquelle pouvait passer le rayonnement d'un tube très fin rempli de matière active, comme le montre la fig. 23, Pl. V. La fente était partiellement recouverte, de l'autre côté de la lame, par des

prismes de diverses matières, prisme de verre ou de quartz de 45°, prismes d'aluminium ou cuivre de 30° environ. Une feuille très mince d'aluminium recouvrait la fente de façon à intercepter la lumière émanée de la source. Une cale de verre de la hauteur du prisme permettait de faire reposer horizontalement ce système sur une plaque photographique par une arête du prisme. Le rayonnement qui atteignait la plaque après avoir traversé la fente, était, pour une partie, le rayonnement direct, pour l'autre le rayonnement transmis au travers du prisme. On n'a pas observé de décalage appréciable dans les deux images. La fig. 26, Pl. V est la reproduction d'une des épreuves obtenues. L'impression générale de la plaque est due aux rayons secondaires émis par le couvercle et les parois de la boîte de carton dans laquelle était enfermée la plaque photographique en expérience. Cette expérience est analogue à une expérience de M. Rutherford qui avait conduit au même résultat négatif. Ces dernières épreuves paraissent décisives pour établir le fait de l'absence de réfraction, et l'explication des bords blancs mentionnés plus haut doit être recherchée dans un effet autre que la réfraction.

§ 4. — *Rayonnement secondaire.*

Les phénomènes du rayonnement secondaire qui, au début de ces recherches, avaient été attribués à une réflexion diffuse consistent en une émission nouvelle par les corps qui reçoivent le rayonnement direct d'une source radioactive. Comme il a déjà été dit plus haut, cette émission secondaire paraît analogue à celle qui a été découverte

par M. Sagnac, et qui dérive de l'action des rayons de Röntgen. Les analogies et les différences seront précisées plus loin. On verra que dans le rayonnement des corps radioactifs il existe un rayonnement pénétrant analogue aux rayons X, et qui excite des rayons secondaires semblables aux rayons de M. Sagnac, mais, dans la plupart des épreuves photographiques déjà mentionnées, les effets obtenus après des poses relativement courtes, sont dus à la transformation de rayons d'une nature autre que celle des rayons X.

On peut observer une émission secondaire dans la plupart des épreuves faites avec l'uranium; des effets analogues ont été obtenus avec le thorium. Le rayonnement plus intense du radium donne un rayonnement secondaire intense sur les corps qu'il frappe. Le polonium produit également des effets secondaires, les figures 17 et 18 pl. IV en donnent divers exemples sur lesquels on reviendra dans un autre chapitre.

L'expérience suivante montre que cet effet est à peu près le même pour diverses substances. Une petite quantité de carbonate de radium a été enfermée dans un petit cylindre de papier noir fermé à sa partie inférieure et maintenu à quelques millimètres au-dessus d'une plaque photographique. Le papier noir du cylindre a pour but d'arrêter la lumière propre du sel de radium. Sur la plaque photographique on place une feuille de mica très mince, puis sur le mica, dans des inclinaisons variées, des lames de diverses substances, cuivre, plomb, étain, zinc, bismuth, aluminium, papier, bois, verre, fluorine phosphorescente (Pl. V, fig. 24). La feuille de mica a pour objet d'éviter

l'action de vapeurs métalliques ou autres sur la plaque photographique.

Lorsqu'on développe la plaque au bout de plusieurs jours de pose, on constate qu'en face de l'ombre portée par chaque corps il s'est produit sur le bord antérieur une action très énergique émanant nettement de ceux-ci. L'épreuve reproduite (Pl. V, fig. 27) a été obtenue du 14 au 17 mars 1899. L'action secondaire n'a pas été très différente pour les diverses substances; les métaux polis ou bruts ont donné sensiblement le même effet; la fluorine a manifesté une action particulièrement énergique, ce dernier effet est dû en partie à la phosphorescence lumineuse excitée dans la fluorine; une feuille de papier noir interposée entre la plaque et le cristal arrêterait cet effet.

Des expériences exécutées avec les mêmes substances soit dans l'air à la pression atmosphérique, soit dans le vide partiel à 2 millimètres de pression, ont donné des effets à très peu près semblables. On retrouvera plus loin sous une autre forme ces effets secondaires.

§ 5. — *Recherches sur les phénomènes de phosphorescence produits par le rayonnement du radium* (1).

Le 6 octobre 1899 M. Curie eut l'obligeance de me remettre quelques milligrammes d'un chlorure de radium radifère très actif, corps dont l'activité était estimée à 70 000 fois celle de l'uranium pour l'ionisation de l'air;

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIX, p. 912 (4 déc. 1899).

avec ce produit M. et Mme Curie venaient de découvrir la radioactivité induite, phénomène que nous étudierons plus loin et qui est tout à fait distinct de la radioactivité secondaire que j'ai signalée plus haut. Cette même préparation avait également été étudiée par M. Demarçay au point de vue spectral et lui avait permis de déterminer quinze raies nouvelles caractéristiques du radium. J'ai pu, avec cette petite quantité de matière, faire un très grand nombre d'expériences qui m'ont donné les résultats suivants, ainsi que la plupart de ceux qui seront exposés dans le chapitre V.

Je me suis d'abord proposé d'étudier les phénomènes de phosphorescence excités sur diverses substances par le rayonnement du radium, rayonnement assez intense pour provoquer la fluorescence du platino-cyanure de baryum, ainsi que l'avait observé M. Curie.

Les substances qui ont été soumises à l'expérience ont été celles qui avaient servi autrefois aux travaux de mon père et plus tard aux miens. Je citerai notamment diverses préparations de sulfure de calcium et de strontium, très lumineuses sous l'action de la lumière, des minéraux tels qu'un rubis, un diamant, une variété de spath calcaire manganésifère, divers échantillons de fluorine et de la blende hexagonale très phosphorescente préparée autrefois par M. Sainte-Claire Deville. Ces substances étaient pour la plupart dans l'état où mon père les avait préparées pour ses expériences; elles étaient réduites en poudre et collées sur des feuilles très minces de mica.

Lorsqu'on se place dans l'obscurité et qu'on approche ces substances à quelques millimètres du corps radiant en

évitant l'interposition de toute autre matière que l'air, on reconnaît que la plupart d'entre elles deviennent lumineuses. Celles dont le spectre d'excitation est formé de rayons lumineux (1), telles que le rubis et le spath calcaire précités, ne deviennent pas phosphorescentes. Au contraire, celles des substances qui s'illuminent dans les rayons violets ou ultra-violets, ou sous l'influence des rayons de Röntgen, deviennent généralement lumineuses sous l'influence du rayonnement du radium.

On observe cependant des différences profondes dans les effets de ces deux rayonnements. Ainsi l'échantillon de diamant qui a servi dans ces expériences est vivement lumineux dans le phosphoroscope et sous l'action du radium; il n'est pas devenu lumineux avec le rayonnement du tube focus que j'ai employé en l'entourant d'une feuille de papier noir. Le sulfate double d'uranyle et de potassium est plus lumineux que la blende hexagonale sous l'influence de rayons X, il l'est moins avec le radium. Le sulfure de strontium, lumineux vert, est vivement excité par les deux rayonnements; le sulfure de calcium lumineux bleu, au bismuth, est à peine excité par les rayons X, alors qu'il devient lumineux lorsqu'on l'approche du sel radifère. Je me borne à ces exemples que l'on pourrait multiplier.

Afin d'avoir des données plus précises sur les intensités relatives des effets lumineux ainsi observés, j'ai établi la disposition photométrique suivante : le chlorure de radium était placé sur un support mobile muni d'une vis micromé-

---

(1) Ed. Becquerel, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. LXIX, p. 994, 1869.

trique qui lui permettait de s'abaisser ou de s'élever de hauteurs connues; au-dessus, la substance phosphorescente, collée sur une lame de mica ou de verre, la face tournée du côté de la matière active, était disposée sur un support fixe. A côté de la substance phosphorescente étudiée, on projetait sur une feuille de papier blanc, par réflexion au travers d'un prisme à réflexion totale, l'image d'une source lumineuse d'intensité constante, obtenue au travers d'une lentille munie d'un diaphragme variable, à œil de chat; en faisant varier la surface de l'ouverture on faisait varier l'intensité de l'image proportionnellement à cette surface, et l'on mesurait cette intensité après l'avoir rendue autant que possible égale à celle de la substance phosphorescente.

La source lumineuse était un petit rectangle de verre dépoli, éclairé soit par une lampe Carcel, soit par un bec Auer. Des verres colorés permettaient de donner à l'image une teinte voisine de celle des lueurs phosphorescentes.

En plaçant diverses substances à six millimètres environ au-dessus de la matière active, on a eu pour les intensités relatives les nombres suivants :

SUBSTANCES PHOSPHORESCENTES.	INTENSITÉS RELATIVES DE LA PHOSPHORESCENCE		RÉDUCTION DE LA PHOSPHORESCENCE PAR L'INTERPOSITION D'UNE FEUILLE DE PAPIER NOIR ENTRE LA SOURCE ET LA SUBSTANCE.
	Sans écran interposé entre la source et la substance étudiée.	Lorsque le rayonnement excitateur a traversé une feuille de papier noir.	
Blende hexagonale.	13,36	0,507	0,038
Platino-cyanure de baryum.	1,99	0,105	0,053
Diamant.	1,14	0,011	0,010
Sulfate double d'uranyle et de potassium.	1,00	0,310	0,310
Fluorure de calcium (chlorophane verte).	0,30	0,006	0,020

Ces nombres ne sont pas des valeurs caractérisant d'une manière absolue les substances étudiées. Ils sont relatifs aux écrans phosphorescents tels qu'ils ont été préparés; l'intensité varie avec la densité de la couche pulvérulente.

On a fait ensuite mouvoir la vis micrométrique du support, de manière à éloigner la matière active à diverses distances de la substance phosphorescente.

La lumière émise par la substance active elle-même était assez forte pour troubler les mesures. Afin d'éliminer ce rayonnement lumineux, on faisait reposer la substance phosphorescente à étudier, sur une feuille très mince d'aluminium battu repliée en double sur elle-même. L'absorption de cette feuille mince, pour le rayonnement étudié, est très faible. Dans ces conditions on a obtenu, pour l'effet produit à diverses distances par les radiations qui traversent la feuille double d'aluminium, les intensités relatives suivantes :

DISTANCES.		PLATINO-CYANURE DE BARYUM.	DIAMANT.	SULFATE DOUBLE D'URANYLE ET DE POTASSIUM.		
d	d^{-2}	i	i	d	d^{-2}	i
mm.				mm.		
6,3		1	1	5,6	1	1
8,5	0,549	0,480	0,543	7,8	0,515	0,556
11,5	0,299	0,262	0.262	10,8	0,268	0,267
13,5	0,217	0,167	0,167	12,8	0,191	0,175

On voit par ces nombres que l'intensité varie un peu plus vite que la raison inverse du carré de la distance à la matière active, ce qui indique une absorption du rayonnement excitateur par l'air.

Cette absorption est différente pour le rayonnement particulier qui excite chaque substance.

Le support fixe était disposé de façon qu'on pût interposer entre la source radiante et le corps phosphorescent des écrans de diverses natures. On constate alors que les mêmes écrans affaiblissent très inégalement le rayonnement qui excite la phosphorescence des diverses substances.

La dernière colonne du premier tableau ci-dessus est relative à l'affaiblissement observé lorsque le rayonnement qui excite les diverses substances a traversé une feuille de papier noir.

Parmi les diverses séries d'expériences réalisées, je citerai la suivante : les substances phosphorescentes étaient environ à six millimètres au-dessus de la matière active et reposaient soit sur une feuille double d'aluminium, soit sur une feuille de papier noir, pour arrêter la lumière émanée de la source.

INTENSITÉS RELATIVES DE LA PHOSPHORESCENCE PROVOQUÉE PAR LE RAYONNEMENT DU RADIUM AU TRAVERS DE DIVERS ÉCRANS

ÉCRANS.		SUBSTANCES REPOSANT				
		SUR UNE DOUBLE FEUILLE D'ALUMINIUM BATTU.				sur du papier noir.
NATURE.	ÉPAISSEUR.	Blende hexagonale.	Diamant.	Platino-cyanure de baryum.	Sulfate double d'uranyle et de potassium.	Sulfate double d'uranyle et de potassium.
Sans écran.	»	1	1	1	1	1
Alum. battu feuille double. .		0,9140	0,9660	0,8530	0,996	0,999
Mica.	0mm,025	0,0756	0,0289	0,0784	0,417	0,772
Papier noir.	0mm,068	0,0384	0,0108	0,0713	0,387	0,890
Aluminium	0mm,098	0,0275	0,0055	0,0561	»	0,637
Verre	0mm,140	0,0263	0,0046	0,0445	0,241	0,613
Ebonite.	0mm,758	»	0,0009	0,0137	0,111	0,316
Cuivre.	0mm,090	0,0148	0,0000	0,0137	0,117	0,325

Ce tableau, ainsi que d'autres analogues que je ne rapporte pas, montrent qu'un même écran absorbe inégalement le rayonnement qui excite la phosphorescence de diverses substances.

On peut interpréter ce résultat en admettant que chaque substance est excitée par une partie spéciale du rayonnement total, comme on l'observe pour le rayonnement lumineux, et l'on en conclut que le rayonnement de la source radiante se compose de rayonnements de diverses natures, caractérisés ici par leur absorption, et présentant des différences analogues à celles des radiations de diverses longueurs d'onde d'un faisceau de lumière blanche.

On reconnaît, en particulier, que la phosphorescence du sulfate double d'uranyle et de potassium est excitée par des rayons très pénétrants; le faisceau filtré par du papier noir contient moins de rayons absorbables que celui qui a traversé seulement la double feuille d'aluminium battue. L'intensité de ce faisceau pénétrant est seulement réduite au tiers après son passage au travers d'une lame de cuivre de $0^{mm},1$. Au contraire, le rayonnement qui excite la phosphorescence des autres corps, et en particulier celle du diamant est extrêmement absorbable; le mica et le papier noir ne laissent passer que quelques centièmes de l'intensité primitive de ce rayonnement particulier.

Parmi les effets de phosphorescence observés, l'un des plus curieux est la persistance considérable de la phosphorescence excitée par le radium dans certains minéraux, et en particulier dans la fluorine. La phosphorescence de la

fluorine reste observable pendant plus de vingt-quatre heures après que l'influence du radium a cessé.

On a expérimenté avec divers échantillons de fluorine réunis autrefois pour mes recherches et qui, exposés à la lumière du jour ou au soleil, puis examinés ensuite dans une chambre noire, sont faiblement phosphorescents. Si on les expose à la lumière de l'arc électrique, ils deviennent beaucoup plus lumineux, et conservent une phosphorescence appréciable pendant des heures entières. Le même effet est obtenu lorsqu'on fait éclater, très près d'un cristal de fluorine, la décharge d'une bouteille de Leyde. Le rayonnement du radium produit une action presque aussi intense.

On doit rapprocher ce phénomène de celui qui a été observé par sir W. Crookes puis par mon père (1), sous l'influence des rayons cathodiques dans un tube à gaz très raréfié; la persistance lumineuse de matières qui s'éteignent assez lentement dans le phosphoroscope est considérablement augmentée; on observe facilement ce phénomène avec le spath d'Islande, le verre, la fluorine, la leucophane; la phosphorescence des substances qui s'éteignent très vite, comme les sels d'uranium ou les platinocyanures, ne présente pas de persistance observable autrement qu'au phosphoroscope. Dans les expériences précitées, mon père avait reconnu que le spath fluor blanc se colore rapidement en violet sous l'influence des rayons cathodiques; le même effet avait été observé en 1832, par

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CI, p. 205, 1885.

M. Perseal (1), sous l'influence de l'étincelle électrique. Le rayonnement de la préparation de radium avec laquelle ont été faites les expériences présentes n'a pas fait naître, pendant la durée relativement courte de l'influence, ce phénomène de coloration au travers d'une feuille de mica qui supportait les fragments de fluorine influencés. Il semble que ce soit le même phénomène que la coloration violette du verre sous l'action du radium, signalée par M. et Mme Curie.

L'influence des radiations du radium sur la phosphorescence par la chaleur, a donné lieu à un résultat intéressant.

On sait que la fluorine naturelle est phosphorescente par la chaleur ou thermo-luminescente. Si on l'échauffe, elle rend sous forme de lumière une quantité d'énergie qu'elle a dû emmagasiner antérieurement, et qu'elle aurait conservée si elle n'avait pas été échauffée. Cette élévation de température la rend impropre à devenir de nouveau lumineuse par une calcination ultérieure. Un grand nombre de minéraux et toutes les préparations phosphorescentes présentent cette propriété.

Dessaignes, en 1809, avait observé qu'en faisant éclater la décharge d'une bouteille de Leyde, très près des corps calcinés et devenus inactifs, on leur rendait la faculté d'être de nouveau phosphorescents par la chaleur, soit immédiatement, soit à une époque ultérieure quelconque. L'action prolongée des rayons violets et ultra-violets produit le même effet (2).

---

(1) *Ann. de Ch. et de Phys.*, t. XLIX, p. 337 et 346, 1832.

(2) Ed. Becquerel, « La Lumière », t. I, p. 51.

J'ai eu l'occasion de montrer (1) que dans le phénomène de la phosphorescence par la chaleur, la lumière émise est identique, comme composition, à celle que l'on observe avec le phosphoroscope sous l'influence de la lumière.

Pour la fluorine, en particulier, le spectre de la lueur émise se compose des mêmes raies et bandes, qui apparaissent et persistent dans un ordre révélant la plus ou moins grande rapidité d'extinction, ou la plus ou moins grande capacité lumineuse de substances ou de combinaisons diverses existant dans le minéral. Avec la fluorine verte qui a servi aux expériences décrites plus haut, lorsque l'étincelle rend au cristal, devenu inactif, une énergie nouvelle, l'émission lumineuse est la même qu'au phosphoroscope. On remarque toutefois la prédominance d'une lueur continue verte et bleue, avec deux maxima dont les longueurs d'onde sont comprises dans les limites ($0^{\mu},530$ à $0^{\mu},510$ et $0^{\mu},488$ à $0^{\mu},480$). On reconnaît, avec le phosphoroscope, que cette lueur a une durée de persistance plus grande que celles des autres bandes, mais qu'elle est plus lente à atteindre son intensité maximum.

On a soumis à l'influence du radium, en les plaçant sur une lame mince de mica, à quelques millimètres au-dessus de la matière active, des fragments de fluorine préalablement calcinés et rendus inactifs.

Ces fragments, qui deviennent alors instantanément lumineux, redeviennent rapidement capables de rendre, quand on les échauffe, une lueur identique à celle qui est émise

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXII, p. 557, 1891.

lorsque la faculté de luire est restituée par une étincelle électrique; on y observe la prédominance de la bande (531 à 478) signalée plus haut.

Déjà, en 1897, M. Borgman (1) avait pu manifester avec les rayons de l'uranium un effet de thermo-luminescence sur des mélanges de sulfate de calcium et de sulfate de manganèse.

CONCLUSIONS

En résumé, il résulte de cette étude des radiations nouvelles au moyen des phénomènes de phosphorescence, que celles-ci produisent des effets analogues à ceux que font naître les rayons cathodiques; que le faisceau des radiations émises par le radium est formé de parties inégalement actives sur diverses substances et inégalement absorbables par une même série d'écrans. Les expériences rapportées au début de ce chapitre avaient montré la différence essentielle entre les rayons du polonium et ceux du radium. Ces considérations nous ont acheminé progressivement vers une analyse plus complète des radiations émises. Un phénomène dont il va être question dans le chapitre suivant, est venu donner le moyen de faire cette analyse et d'identifier une partie du rayonnement avec les divers rayons auxquels donnent naissance les décharges électriques dans les tubes à gaz raréfiés.

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIV, p. 895.

CHAPITRE V

I. — INFLUENCE D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE SUR UNE PARTIE DU RAYONNEMENT DES CORPS RADIOACTIFS

§ 1. — *Premières observations sur les rayons déviables par un champ magnétique.*

Les observations dont il vient d'être question à la fin du chapitre précédent, conduisaient à rechercher si le rayonnement du radium ne présenterait pas quelques autres des propriétés des rayons cathodiques. Parmi les propriétés de ces rayons leur déviation magnétique est une des plus importantes.

Je venais de réaliser plusieurs expériences montrant que le rayonnement du radium est dévié par un champ magnétique, expériences qui vont être décrites ci-après, lorsque j'ai appris que MM. Stefan Meyer et Egon R. von Schweidler venaient de faire une publication sur le même phénomène, et que cette action avait été vue antérieurement par M. F. Giesel.

MM. Elster et Geitel (1) avaient déjà observé que la conductibilité communiquée par les nouveaux rayons à l'air raréfié, était diminuée par l'action d'une force magnétique.

M. Giesel (2), qui avait préparé des substances très actives, avait employé une disposition très simple pour rechercher l'influence d'un champ magnétique sur le rayonnement de ces substances. Un écran phosphorescent était placé sur les pôles d'un électro-aimant; à 1 centimètre environ au-dessous, on avait disposé une préparation active (que M. Giesel appelait polonium). On observait une tache phosphorescente qui se déplaçait quand l'aimant était excité. Une préparation de radium donna des effets analogues. En enveloppant de papier noir la matière active (polonium) et en substituant à l'écran une plaque photographique, M. Giesel obtint des épreuves montrant la déviation du rayonnement. Ces épreuves sont du reste diffuses et accompagnées de traces filamenteuses en forme d'S qui n'ont pas été observées depuis par d'autres expérimentateurs. Pour interpréter convenablement le sens de la déviation du rayonnement d'après ces épreuves il faut observer que la matière était en dessous et que la plaque était renversée. La publication de M. Giesel est datée du 31 octobre 1899. M. Giesel, à qui l'on doit de très importantes observations surtout au point de vue chimique dans le domaine de la radioactivité, ne paraît pas s'être attaché ultérieure-

(1) *Elster et Geitel. Verh. Deutsch. Chem. Gesell.* (mai 1899) *Wied. Ann.*, t. LXIX, p. 88, 1899.

(2) *Giesel Wied. Ann.*, t. 69, p. 834, 1899.

ment à une étude physique plus complète du phénomène important qu'il venait de mettre en évidence.

Presque simultanément, MM. Stefan Meyer et E. von Schweidler (1) étudiaient les perturbations apportées dans la conductibilité de l'air lorsque des matières actives analogues aux précédentes sont placées dans un champ magnétique. Ayant eu communication par M. Giesel de ses observations, ils répétèrent l'expérience de fluorescence en plaçant la matière active sur l'écran et transportant le tout dans un champ magnétique. Ils virent que le rayonnement était ramené sur l'écran, et que la tache lumineuse était d'autant plus voisine de la source que l'intensité du champ était plus considérable. La figure ci-contre (fig. 15) extraite de leur publication montre qu'ils avaient vu nettement le sens du phénomène (la déviation, dans la figure, correspond à un champ magnétique produit par un pôle + placé en avant du tableau); elle montre encore qu'ils avaient supposé les trajectoires circulaires dans un plan normal au champ, ce qui est exact, mais la figure est incorrecte, car si le rayonnement eût été homogène, toutes les circonférences eussent dû avoir le même rayon, et si le rayonnement est hétérogène les trajectoires circulaires qui partent d'un même point ont des rayons différents. Nous examinerons plus loin cette question.

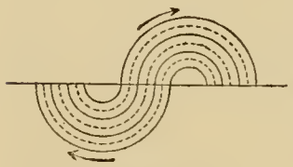


Fig. 15.

Dans leurs recherches ultérieures, MM. Meyer et

(1) *Akadem. Anzeiger Wien*, n° 22 (3 nov.), 23 (9 nov.) 1899. *Physikal. Zeischrift*, t. 1, p. 90 et 113.

v. Schweidler ne se sont pas non plus attachés à une étude plus approfondie de la déviation magnétique.

J'ai dit plus haut comment, sans avoir eu tout d'abord connaissance de ces expériences, j'avais été conduit de mon côté à observer la déviation magnétique du rayonnement du radium. Ayant vu de suite tout le parti que l'on pouvait tirer de ce phénomène pour l'analyse du rayonnement je m'attachai à cette étude et je réalisai un très grand nombre d'expériences et de déterminations qui vont être exposées dans ce chapitre et dans quelques-uns des chapitres suivants.

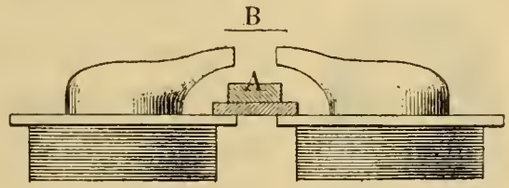


Fig. 16.

Comme suite à mes expériences sur la phosphorescence excitée par le rayonnement du radium, j'avais disposé (1), le 7 décembre 1899, entre les armatures d'un fort électro-aimant, terminées par deux petites surfaces planes de fer doux de 14 millimètres environ de diamètre, la petite quantité de carbonate de radium dont il a été question plus haut, et qui était placée en A (fig. 16), au-dessous du champ; en B était fixé un petit écran phosphorescent de sulfate double d'uranium et de potassium. Cette matière devenait lumineuse sous l'action du radium. La distance AB étant de quelques centimètres, si l'on venait à exciter l'électro-aimant, la phosphorescence disparaissait. En rapprochant alors l'écran de la source, à $1^{cm},5$ environ, on retrouvait

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, t. CXXIX, p. 996 (11 déc. 1899).

une région d'excitation lumineuse déplacée, et le sens du déplacement changeait avec le sens du courant. En déplaçant l'écran, je reconnus qu'on obtenait, en particulier, une action très vive près des pôles comme si une partie des rayons actifs étaient concentrés sur ceux-ci.

Je formai alors un écran cylindrique, au moyen d'un bout de tube de verre de $1^{mm},5$ d'épaisseur, de 26 millimètres de diamètre intérieur et de $9^{mm},5$ de hauteur. La surface intérieure était enduite de sulfate double d'uranium et de potassium pulvérisé, et la matière active, recouverte d'une feuille mince d'aluminium, était placée au centre, de sorte que tous les points de l'écran étaient sensiblement à la même distance de la source radiante (fig. 17). Si l'on place la matière entre les pôles et l'écran normalement au champ, on constate que si l'électro-aimant n'est pas excité, la partie supérieure de l'écran est lumineuse, mais si l'on excite l'électro-aimant, la phosphorescence disparaît presque complètement en tous les points. On en conclut que dans la direction normale au champ, toutes les radiations activant la phosphorescence suivent des trajectoires qui les maintiennent à l'intérieur de l'écran circulaire. En faisant tourner l'écran circulaire autour d'un axe vertical, de façon à le placer parallèlement au champ, on voit les régions voisines des pôles devenir vivement lumineuses.

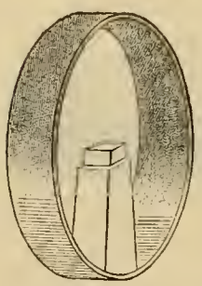


Fig. 17.

J'ai cherché à suivre la trace du rayonnement dans les deux directions principales de symétrie du champ.

1° *Effets produits dans le sens des lignes de force.* — Les

surfaces polaires étant éloignées à une distance d'une dizaine de millimètres, la matière active déposée sur du papier et recouverte d'une feuille mince d'aluminium avait été placée près du centre de l'une des surfaces polaires, puis contre l'autre pôle on avait disposé un écran fluorescent, soit de sulfate double d'uranyle et de potassium, soit de platino-cyanure de baryum, de blende hexagonale, de diamant, ou d'autres matières phosphorescentes. Tant que l'électro-aimant n'est pas excité, la phosphorescence apparaît sous la forme d'une large tache lumineuse, s'étendant bien en dehors de la surface polaire en contact avec l'écran : la lueur est assez faible lorsque la distance de l'écran à la source est de 1 centimètre conformément aux expériences relatées à la fin du chapitre précédent.

Si alors on excite l'électro-aimant, on voit la tache lumineuse se rétrécir et devenir considérablement plus intense; la lueur dépasse à peine les contours de la pièce polaire, et il semble qu'un grand nombre de rayons excitateurs émanés du radium viennent aboutir à cette surface. L'effet est le même si on change le sens de l'aimantation. Le même phénomène se produit lorsqu'on interpose entre la matière active et la surface fluorescente des écrans de diverses natures, papier noir, verre, etc., l'intensité est seulement affaiblie ainsi que je l'ai indiqué antérieurement.

Si, aux écrans phosphorescents on substitue contre la surface polaire une plaque photographique, on obtient en quelques instants des épreuves dont la figure 28, Pl. VI est un exemple. Cette épreuve a été obtenue en posant d'abord 5 minutes sans le champ magnétique,

puis en glissant la plaque parallèlement à elle-même, en excitant le champ et en posant encore 5 minutes. La plaque montre à la fois l'impression faible et diffuse en l'absence du champ magnétique et la concentration du rayonnement suivant les lignes de force de celui-ci.

J'avais pensé alors que l'augmentation considérable de l'intensité pourrait donner le moyen de concentrer sur une petite surface polaire l'action d'une large surface de matière peu active telle que l'uranium, mais l'expérience n'a rien donné d'utilisable.

2° *Effets observés dans un plan parallèle au champ.* — La photographie, par la netteté des détails qu'elle enregistre, a donné pour l'étude du champ des résultats bien supérieurs à ceux de la fluorescence. J'ai réalisé en particulier les expériences suivantes :

1° On place parallèlement au champ, entre les deux pôles distants de 45 millimètres, une plaque photographique horizontale entourée de papier noir. Après avoir excité l'électro-aimant, on dépose sur la plaque, à égale distance des pôles, la matière active. Au bout de quelques minutes on la retire, on développe la plaque et l'on constate que l'impression très forte, au lieu de s'être faite uniformément autour de la source, est tout entière rejetée sur la droite du champ (à gauche pour un observateur qui regarde le pôle +). (Pl. VI, fig. 29.) En dehors de la tache noire qui marque la place de la source radiante, l'impression maximum est répartie sur une zone étroite qui aboutit aux pôles. L'écart maximum correspond à la direction normale au champ passant par la source qui, dans le cas actuel, est sensiblement au milieu du champ. Le maxi-

mum d'intensité de l'impression a aussi lieu dans cette direction. De part et d'autre de ce maximum la courbe s'infléchit et rejoint les pôles presque normalement aux surfaces polaires, d'un même côté par rapport au centre de ces surfaces. D'autres épreuves ont montré que l'écart et la courbure diminuaient à mesure que le champ magnétique était plus intense.

Cette expérience se trouve être semblable à celle de M. Giesel, mais elle présente déjà beaucoup plus de netteté. Elle est identique en principe à celle que MM. Meyer et v. Schweidler ont faite avec un écran fluorescent. Ces auteurs ont seulement vu le sommet de la courbe.

Les rayons émis au-dessous de la plaque devraient donner au travers de celle-ci la courbe symétrique, mais dans notre expérience ils sont absorbés par le verre qu'ils ont à traverser deux fois.

Cette expérience explique les faits observés au début avec les écrans fluorescents et, en particulier, l'absence de phosphorescence dans un champ intense sur un écran cylindrique dont le rayon est supérieur au diamètre moyen des trajectoires infléchies des rayons les plus actifs.

2° Une seconde expérience consiste à placer le radium près de l'un des pôles, du pôle + par exemple, la plaque photographique restant dans la même position que ci-dessus. L'impression affecte encore la forme d'une ligne tout entière à droite du champ (fig. 30, Pl. VI). A côté de la tache marquant la place de la source se trouve, à droite du champ, une tache presque aussi intense rejoignant la première, impression due aux rayons très fortement infléchis normalement au champ, très intense dans

cette région; puis l'impression va en diminuant jusqu'au milieu où elle est minimum; elle augmente de nouveau en s'approchant de l'autre pôle où l'impression intense forme une sorte d'image dispersée de la source radiante.

Si, au lieu de placer la matière active près d'un des pôles ou à égale distance de ceux-ci, on la place à une distance quelconque, on trouve toujours une impression curviligne rejetée à droite du champ et pour laquelle le maximum d'intensité est produit par les rayons déviés normalement au champ.

§ 2. — *Rayons peu déviables, ou rayons α.*

Les premières expériences de MM. Giesel, Meyer et v. Schweidler faites avec des matières moins pures que celles que préparaient M. et Mme Curie, semblaient montrer que le rayonnement de toutes les substances actives était déviable, bien qu'à cette époque l'on n'ait pu encore observer aucun effet avec l'uranium. Je n'ai pas tardé à reconnaître que la déviation magnétique du rayonnement, telle qu'elle venait d'être observée, n'était pas un phénomène général (1).

M. et Mme Curie avaient eu l'obligeance de me remettre une très petite quantité d'azotate de polonium presque aussi actif que les préparations radifères d'alors, soit pour ioniser l'air, soit pour impressionner une plaque photographique. Le rayonnement de cette substance, placée dans un champ magnétique, n'a manifesté aucune influence

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIX, p. 1205 (26 décembre 1899).

de l'ordre de celle qu'on observe avec le radium. Ni les phénomènes de phosphorescence ni les actions photographiques n'ont révélé aucune influence appréciable de la part du champ magnétique alors employé.

Je citerai en particulier les expériences comparatives suivantes : Entre les pôles de l'électro-aimant, dans un champ magnétique dont l'intensité a été voisine de 4000 puis de 10000 unités C. G. S, on a placé la préparation de polonium; au-dessus de cette matière, à des distances qui ont été dans diverses expériences de 2 millimètres et de 1 centimètre, on a disposé horizontalement, soit dans le champ, soit en dehors du champ, une plaque photographique non enveloppée, car le rayonnement de polonium est presque totalement arrêté par le papier noir, ainsi que je l'ai montré antérieurement. Dans ces conditions, après quelques minutes de pose, on obtient sur la plaque photographique une impression symétrique par rapport à la position de la source active, et cette impression a paru la même lorsque l'électro-aimant est excité ou lorsqu'il ne l'est pas.

Si au polonium on substitue le radium, dans les mêmes conditions d'expérience, on obtient avec le champ magnétique et sur une plaque enveloppée une impression rejetée dans le sens du courant qui produit le champ et ayant l'aspect que j'ai signalé plus haut.

Le rayonnement de la préparation de polonium qui a été soumis à ces expériences ne subit donc pas les mêmes influences que celui du radium. Ce caractère vient s'ajouter à la très faible pénétration de la partie la plus active de ces rayons qui est arrêtée par une feuille de papier. La

grande absorption du rayonnement du polonium avait été, sinon publiée, du moins vue par M. et Mme Curie lorsqu'ils ont découvert et préparé ces matières, et j'ai indiqué plus haut (1) comment je l'avais mise en évidence par une épreuve photographique.

Il résulte encore de cette expérience que le polonium étudié par M. Giesel et qui lui avait fourni des rayons très déviables, n'avait pas la même propriété que la préparation de M. et Mme Curie. Aucune des préparations de polonium faites par M. et Mme Curie n'a présenté de rayons très déviables comme ceux du radium, tandis que le polonium de M. Giesel émet des rayons très déviables, mais seulement lorsqu'il est récemment préparé.

Pendant que j'étudiais l'action magnétique par la méthode photographique, M. et Mme Curie faisaient une étude analogue par la méthode électrique (2). La matière active était placée entre les deux armatures d'un électro-aimant, au fond d'une rainure profonde formée par des lames de plomb épaisses. En sortant de cette rainure le rayonnement direct passait entre les plateaux d'un condensateur dont l'un était maintenu au potentiel de 500 volts et dont l'autre était relié à un électromètre. La rainure, les plateaux et le champ magnétique étaient parallèles. Lorsque le rayonnement passait entre les plateaux, il s'établissait entre ceux-ci un courant; si le rayonnement était dévié par le champ magnétique, et ne pénétrait plus entre les plateaux, le courant était annulé.

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXVIII, p. 776.
(2) *Id.*, t. CXXX, p. 73, 8 janvier 1900.

M. et Mme Curie ont reconnu ainsi que le rayonnement du radium se compose de deux parties, l'une déviée et l'autre non déviée, dans le cas de leurs expériences, tandis que le rayonnement de toutes leurs préparations de polonium n'était pas dévié. Nous verrons plus loin que cette partie du rayonnement du radium, réputée d'abord non déviable, et que M. Rutherford appelle les rayons α, est très faiblement déviable en sens contraire de la déviation considérée ci-dessus. Ce rayonnement α du radium se comporte comme le rayonnement du polonium; comme lui, il est arrêté par une feuille de papier.

Le rayonnement α du radium est arrêté par une épaisseur d'air de 7 centimètres, celui du polonium par une épaisseur d'air de 4 centimètres pour l'échantillon étudié.

Les rayons déviables n'interviennent que pour une faible part dans les mesures où l'on utilise le rayonnement total pour produire la conductibilité de l'air.

Ces rayons α présentent une particularité remarquable dans leur absorption; tandis que pour les rayons pénétrants du radium le coefficient d'absorption va en décroissant quand l'épaisseur de matière traversée augmente, les rayons α du radium et ceux du polonium sont d'autant plus absorbables que l'épaisseur de matière qu'ils ont dû traverser est plus grande. Cette loi d'absorption constatée par M. et Mme Curie est contraire à ce que l'on connaît pour les autres rayonnements. On verra plus loin que les rayons α peuvent être considérés comme subissant une transformation progressive à mesure qu'ils se propagent dans l'air ou dans les milieux absorbants.

Si l'on utilise l'ensemble des rayons émis, les phéno-

mènes d'absorption se compliquent par la présence des rayons déviables et pénétrants dont nous étudierons plus loin l'absorption élective.

M. et Mme Curie, qui s'étaient demandé si des rayons qui jouissent de propriétés aussi singulières sont bien de véritables rayons se propageant en ligne droite, m'avaient prié d'examiner cette question par une épreuve photographique.

L'expérience fut faite le 5 janvier 1900. Une petite quantité d'azotate de polonium fut placée dans une petite cuve linéaire formée par une rainure étroite creusée dans une feuille de carton. Un fil de cuivre de $1^{mm},5$ de diamètre fut placé à 5 millimètres au-dessus et parallèlement à la source linéaire. Une plaque photographique non enveloppée était disposée parallèlement à 8 millimètres au delà. Après une pose de dix minutes, l'ombre géométrique du fil apparut avec les dimensions prévues, et une pénombre très étroite due à la largeur de la source. L'épreuve reproduite (fig. 16, Pl. IV) montre le résultat obtenu.

La même expérience réussit également bien en plaçant contre le fil une double feuille d'aluminium battu, que les rayons sont obligés de traverser. Il s'agit donc bien de rayons donnant des ombres géométriques parfaites.

Pour mettre en évidence d'une autre manière les deux espèces de rayons dont la présence simultanée dans le radium venait d'être démontrée par M. et Mme Curie, j'ai réalisé plus tard l'expérience suivante (avril et mai 1900).

Une petite quantité d'un sel de radium a été rassemblée dans une rainure pratiquée dans un petit bloc de plomb. Ce bloc dont la rainure a été recouverte d'une fente très

fine formée par deux petites bandes de verre de 1 millimètre d'épaisseur juxtaposées, a été disposé entre les armatures planes d'un électro-aimant; la matière active était recouverte d'une mince feuille d'aluminium de $0^{mm},01$ d'épaisseur, de manière à arrêter tout rayonnement lumineux. On commençait par exciter l'électro-aimant, puis on disposait sur la cuve une plaque photographique inclinée de façon à couper le faisceau plan qui sortait de la fente. Ce faisceau sortait parallèlement au champ magnétique, et était partiellement dévié. Au bout d'une trentaine de minutes de pose, pendant lesquelles le champ a été maintenu rigoureusement constant, on obtint, suivant l'intensité du champ et l'inclinaison de la plaque, des épreuves dont la figure 39, Pl. VII, donne la reproduction.

Si la plaque n'est pas enveloppée de papier noir on a une trace très intense des rayons α, puis une impression des rayons déviés et enfin une trace diffuse de l'autre côté du rayonnement dévié. Cette impression diffuse apparaît symétriquement de chaque côté de la trace non déviée, si l'on n'excite pas le champ magnétique et si l'on recueille seulement la trace rectiligne du rayonnement total. Comme nous l'avons déjà dit, la partie rectiligne est faiblement déviable en sens inverse par un champ très intense. Nous traiterons plus loin cette question.

Nous étudierons ci-après avec détail le rayonnement déviable; l'expérience précédente permet de faire de suite quelques observations sur la partie non déviable ainsi séparée. Par exemple, si la plaque photographique est enveloppée de papier noir ou si la source est couverte soit de papier noir soit d'une feuille d'aluminium de $0^{mm},1$

d'épaisseur, la partie non déviable est supprimée et la partie déviable apparaît seule accompagnée de la partie diffuse (Pl. VII, fig. 40). Une bande de papier noir ou d'aluminium de $0^{mm},1$ d'épaisseur disposée à une hauteur convenable sur la plaque intercepte le rayonnement non déviable, qui apparaît ainsi, comme dans les expériences de M. et Mme Curie, semblable à celui du polonium (Pl. VII, fig. 43).

On peut encore opérer autrement, disposer la plaque photographique horizontalement au-dessus de la cuve à 10 millimètres environ du radium et à 5 millimètres de la fente. On recueille ainsi une trace rectiligne du faisceau non dévié et une bande diffuse représentant le faisceau dévié. On a interposé divers écrans pour étudier l'absorption du faisceau non dévié. L'épreuve reproduite Pl. VII, fig. 41 a été obtenue en plaçant sur la fente un prisme de quartz de 60° (fig. 18). Le rayonnement déviable était rejeté du côté du sommet. La pose a été de 50 minutes. Le rayonnement non déviable a été arrêté et il s'est produit des impressions secondaires assez difficiles à analyser.

Fig. 18.

Il importait de se demander si l'uranium émet également les deux espèces de rayons dont il vient d'être question. La faiblesse du rayonnement a exigé des poses bien plus longues. Une première constatation de l'existence de rayons déviables a été faite (1) en recherchant si l'ombre d'un écran

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 1583, 11 juin 1900.

vertical produite par une source linéaire d'uranium était déviée par un aimant permanent, dont le champ avait une intensité d'environ 1500 unités C. G. S. J'ai refait un peu plus tard (1) une analyse plus précise du rayonnement de l'uranium, par la méthode de la plaque photographique inclinée, posée sur une cuve linéaire. L'épreuve de la fig. 44, Pl. VII, obtenue dans un champ de 1350 unités C. G. S. environ après 42 jours de pose sur une plaque non enveloppée, montre que la totalité du rayonnement actif a été déviée. Il n'y a pas eu trace d'impression par des rayons α très actifs, bien que l'on s'attendît à cette constatation par les conclusions des recherches de M. Rutherford. Il semble que s'il existait une partie peu pénétrante, peu déviable, son action photographique eût dû être plus intense que celle des rayons pénétrants déviables tandis qu'elle n'a pas apparu bien qu'aucun écran ne fût interposé entre la source et la plaque, et que celle-ci fût presque au contact de l'uranium. J'ai repris récemment cette expérience (2) en plaçant l'uranium et la plaque photographique dans un tube en verre où l'on fit le vide aussi parfaitement que possible et qu'on ferma ensuite à la lampe. Le tube fut placé entre les pôles d'un aimant. Au bout de 43 jours de pose, on ouvrit le tube : l'épreuve (Pl. VII, fig. 44 *bis*) fut semblable à celle qu'on avait obtenue dans l'air. Il paraît donc résulter de ces observations que

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIV, p. 208, 27 janvier 1902.

(2) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIV, p. 981, 27 avril 1903.

l'on soit en droit de conclure à l'absence, ou du moins à la faible proportion, dans le rayonnement de l'uranium de cette partie α que l'on rencontre dans le rayonnement du radium et du polonium.

Dans des conditions analogues le thorium a manifesté les deux espèces de rayons (Pl. VII, fig. 45).

A côté des deux espèces de rayons que nous venons de reconnaître, il en existe une troisième, non déviable et extrêmement pénétrante. Nous en verrons les effets dans la plupart des épreuves suivantes. Leur caractère de non-déviabilité a été indiqué d'abord par M. Villard. Nous reviendrons plus loin sur les effets qu'ils produisent.

§ 3. — *Étude des trajectoires des rayons déviables dans un champ magnétique.*

Dès mes premières observations sur la déviation magnétique du rayonnement du radium, je me suis appliqué à mettre à contribution ce phénomène pour l'étude du rayonnement nouveau. La netteté des impressions que l'on peut recueillir a permis de relever les traces des trajectoires et de comparer les observations aux déductions théoriques qui résultent de l'assimilation de ces rayons aux rayons cathodiques.

On sait que l'action d'un champ magnétique d'intensité H sur une masse électrique e animée d'une vitesse v dans une direction faisant un angle α avec la direction du champ, est une force, perpendiculaire à la fois au champ et à la direction de la vitesse, et qui a pour expression :

$$H e v \sin \alpha.$$

Considérons une masse matérielle m transportant avec une vitesse v une charge e dans un champ magnétique uniforme d'intensité H, parallèle à la direction ox (fig. 18 *bis*).

La force étant normale à la vitesse, ainsi qu'à la direction ox, la vitesse reste constante, ainsi que sa projection $v \cos \alpha$ sur l'axe des x; l'angle α est donc constant, et l'abscisse x est donnée par la relation $x = (v \cos \alpha) t$. La vitesse de la projection de m sur le plan yz est constante et égale à $v \sin \alpha$. La force est constante et parallèle à ce plan; la projection de m décrira donc une circonférence de rayon R′ donné par la relation

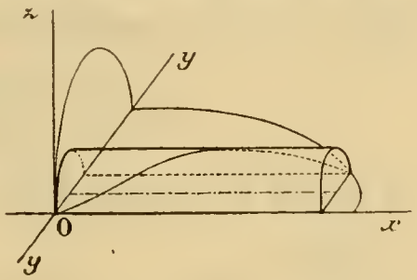


Fig. 18 *bis*.

$$\frac{m (v \sin \alpha)^2}{R'} = H e v \sin \alpha$$

d'où :
$$R' = \frac{m v}{H e} \sin \alpha$$

et si l'on pose
$$\frac{m v}{H e} = R$$

on a :
$$R' = R \sin \alpha$$

R est la valeur maximum de R′ pour $\alpha = 90°$, et correspond au rayon des trajectoires circulaires des particules lancées normalement au champ.

La vitesse angulaire est :

$$\frac{v \sin \alpha}{R'} = \frac{He}{m}$$

elle est indépendante de α.

La projection de m décrit d'un mouvement uniforme la circonférence pendant le temps

$$t = \frac{2\pi m}{\mathrm{H}e}$$

La trajectoire est une hélice enroulée sur un cylindre dont le rayon est $\mathrm{R}\sin\alpha$. Le pas de cette hélice est

$$vt\cos\alpha = \frac{2\pi m v}{\mathrm{H}e}\cos\alpha = 2\pi\mathrm{R}\cos\alpha$$

Le rayon de courbure de la trajectoire est constant et égal à $\frac{\mathrm{R}}{\sin\alpha}$.

Considérons les trajectoires de toutes les particules qui, à l'origine, sont émises dans le plan des xz, parallèle au champ.

Ces trajectoires sont inégalement infléchies depuis celle qui décrit dans le plan normal au champ une circonférence de rayon R jusqu'à celle qui suit sans déviation l'axe des x. Elles s'enroulent toutes sur des cylindres tangents au plan zox le long de ox, et elles rencontrent le plan de xy après avoir parcouru la moitié de leur pas. La longueur de toutes les trajectoires depuis le point o jusqu'à la rencontre avec le plan des xy est donc la même et égale à $\pi\mathrm{R}$. Les coordonnées du point de rencontre sont :

$$y = 2\mathrm{R}\sin\alpha$$

et

$$x = vt\cos\alpha = \pi\mathrm{R}\cos\alpha.$$

les trajectoires en question coupent donc le plan des xy sur l'ellipse

$$\left(\frac{x}{\pi\mathrm{R}}\right)^2 + \left(\frac{y}{2\mathrm{R}}\right)^2 = 1,$$

dont les axes sont $2\mathrm{R}$ et $\pi\mathrm{R}$.

Nous verrons plus loin que les traces obtenues expérimentalement sont des ellipses dont les demi-axes sont $2R$ et πR.

Un autre problème s'est encore posé dans l'interprétation des photographies réalisées, c'est de déterminer la trace, sur un plan parallèle au plan des yz, des trajectoires dont l'élément initial est situé dans le plan des xy. Soit $x = a$ l'équation d'un plan parallèle au plan des yz. La trajectoire dont l'élément initial fait un angle α avec ox dans le plan des xy, s'enroule sur un cylindre de rayon $R \sin \alpha$, tangent en A au plan des xy. Le temps mis par m pour aller de l'origine o jusqu'au point d'intersection M' de sa trajectoire avec le plan $x = a$ est

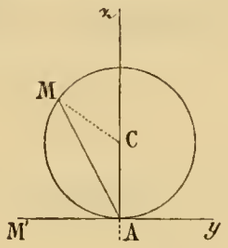


Fig. 18 *ter*.

$$t = \frac{a}{v \cos \alpha}$$

l'angle ACM a pour valeur

$$\mathrm{ACM} = \frac{e\mathrm{H}}{m} \frac{a}{v \cos \alpha} = \frac{a}{\mathrm{R} \cos \alpha}$$

Or l'on a

$$\mathrm{MAM'} = \frac{1}{2} \mathrm{MCA} = \frac{a}{2\mathrm{R} \cos \alpha}$$

Le rayon vecteur AM fait donc avec l'axe des y un angle égal à

$$\frac{a}{2\mathrm{R} \cos \alpha}.$$

Lorsque α varie le point M décrit une courbe dont la tan-

gente à l'origine, pour $\alpha = o$, fait avec Ay un angle égal à $\frac{a}{2R}$. Cette courbe coupe l'axe Az en des points déterminés par des valeurs de l'angle ACM égales à des multiples de π; la courbe repasse périodiquement par l'origine et coupe l'axe Az à des distances de A égales à $2R \sin \alpha$, α étant défini par la relation.

$$\frac{a}{R \cos \alpha} = (2K + 1)\pi.$$

Ces distances sont donc :

$$2\sqrt{R^2 - \frac{a^2}{\pi^2}}, \qquad 2\sqrt{R^2 - \frac{a^2}{9\pi^2}} \text{ \&c.}$$

La courbe reste toujours comprise dans le cercle de rayon R tangent en A à l'axe des y, et elle est asymptotique à ce cercle.

Rappelons encore que, dans le cas d'un champ non uniforme, par exemple dans le cas de deux pôles magnétiques, M. Poincaré (1) a démontré que les trajectoires étaient des hélices enroulées sur un cône ayant pour sommets l'un ou l'autre des pôles en question. M. Birkeland avait réalisé ce phénomène pour les rayons cathodiques et l'expérience décrite plus haut, p. 131, montrant la concentration du rayonnement déviable du radium sur les pôles est conforme à cette conclusion, si l'on assimile à des rayons cathodiques la partie déviable du nouveau rayonnement.

A la suite des expériences rapportées au paragraphe

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXV, p. 530 (5 octobre 1896).

précédent, je me suis proposé d'étudier avec plus de précision les trajectoires des rayons déviés dans un champ magnétique uniforme.

J'avais d'abord cherché (1) à obtenir des coupes du faisceau dévié, les unes parallèlement au champ, les autres normalement. Les premières donnent des traces semblables à celles qui ont été représentées plus haut. Les secondes donnent des impressions limitées par une courbe, sorte de spirale, qui tourne dans le sens du courant équivalant au champ magnétique.

Si la source radiante est un point reposant sur une plaque de verre formant un plan horizontal, et situé à une distance a d'une plaque photographique verticale, on a vu par le calcul de la page précédente que la trace est une courbe dont la tangente, à l'origine, fait avec la trace du plan horizontal un angle égal à $\frac{a}{2R}$ (R étant le rayon des trajectoires circulaires dans le champ considéré).

La courbe Pl. VI, fig. 31, a été obtenue avec un grain de carbonate de radium placé sur une plaque, à $0^{mm},09$ de hauteur, par suite du papier qui le supportait, et à une distance de la plaque verticale de $3^{mm},5$. Dans le champ d'environ 4000 unités CGS qui était utilisé, on avait $2R = 7^{mm},4$. L'angle, à l'origine, est alors égal à celui qui sous-tend un arc égal environ à la moitié du rayon, soit 28° 1/2, ce qui paraît conforme à l'épreuve obtenue.

On a rapporté incidemment cette expérience qui fournit

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIX, p. 1206 (26 décembre 1899).

seulement une vérification complémentaire de celles qui vont être développées ci-après (1).

Déviation magnétique dans le vide. — On rappellera d'abord une série d'expériences qui avaient eu pour but de rechercher si l'air exerçait une influence notable sur la vitesse de propagation du rayonnement déviable. L'expérience n'a montré aucune différence appréciable dans l'air ou dans le vide, mais j'ai reconnu ultérieurement qu'on ne pouvait rien conclure de cette expérience. Nous verrons, en effet, que les écrans absorbants arrêtent des rayons de certaines vitesses et laissent passer des rayons animés de vitesses plus grandes. Or, les plaques photographiques étaient enveloppées de papier noir, et s'il arrivait que la présence de l'air ralentît tous les rayons, ceux qui traverseraient le papier proviendraient de rayons primitivement plus rapides et ramenés à une vitesse moindre, mais comme rien ne les distingue plus de ceux dont ils ont pris la vitesse, ils feraient alors leur impression à la même place, et, conformément à l'expérience, on n'observait aucune différence. La même conclusion s'appliquerait à toute autre modification des rayons, portant à la fois sur leur pénétrabilité et sur la courbure de leurs trajectoires.

L'expérience présente cependant des particularités intéressantes. Elle a été réalisée de la manière suivante : un tube de verre fermé à une extrémité, et en relation par l'autre, au moyen d'un tube de plomb, avec une trompe à mercure, était disposé horizontalement entre les pôles d'un

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 206 (29 janvier 1900).

électro-aimant, et normalement au champ. Dans ce tube, à côté d'un peu d'acide phosphorique pour dessécher l'air, était placée une petite plaque photographique horizontale, enveloppée de papier noir; sur cette plaque était posée une petite cuve de plomb de $0^{mm},94$ d'épaisseur contenant la matière active rassemblée dans un trou de 1 millimètre environ de diamètre percé dans une carte, maintenu en dessous par du papier noir, et en dessus par une très mince feuille d'aluminium. Dans ces conditions, la matière peut rester plusieurs heures sur la plaque sans la voiler, et donne seulement une impression directement au-dessous de la source à travers le plomb.

On fait alors plus ou moins complètement le vide dans le tube, puis on fait passer dans l'électro-aimant un courant qu'on maintient constant. Les rayons ramenés sur la plaque photographique par le champ magnétique impressionnent celle-ci d'un côté de la source. Au bout d'une dizaine de minutes de pose on interrompt le courant, on laisse rentrer l'air, puis on fait passer dans l'électro-aimant un courant égal au premier, pendant le même temps, mais en sens inverse, de façon à rejeter l'impression de l'autre côté de la source; on peut ainsi, sur la même épreuve, comparer les effets obtenus dans le vide, et dans l'air à la pression atmosphérique.

On a opéré avec des pressions de 7 millimètres, de 2 millimètres, de $0^{mm},1$ de mercure et dans le vide presque absolu. Dans tous les cas, les deux impressions ont paru à très peu près identiques de part et d'autre de l'impression directe de la source, comme le montre la fig. 33, Pl. VI, qui correspond à un champ d'intensité $H = 4080$. L'impression est

limitée du côté de la source par des courbes qui affectent à peu près la forme théorique d'arcs d'ellipse dont les demi-axes sont dans le rapport de 2 à π (3,1416).

On doit remarquer que, même si le rayonnement était homogène, la partie déviée dans le plan normal au champ se composerait d'une infinité de trajectoires circulaires de même rayon passant toutes par la source ponctuelle. Lorsque celle-ci est dans le plan de la plaque photographique, la trace de l'enveloppe de ces trajectoires tombe au même point que la trace de la trajectoire émise normalement à la plaque; dans ce cas, il paraît vraisemblable que le lieu du maximum d'impression s'écarte peu de ce point et que l'impression doive se présenter sous forme diffuse et dégradée du côté de la source. On devrait alors avoir pour le lieu du maximum les arcs d'ellipse théoriques.

Mais dans l'expérience ci-dessus la source n'est pas exactement sur la plaque photographique; par suite de l'épaisseur du fond de la cuve et de l'élasticité du papier noir qui la soulève, la source était à une distance z_0 au-dessus de la plaque, que l'on a estimée à $2^{mm},17$.

Si l'on suppose que la trajectoire issue normalement de la source est encore celle qui produit l'impression maximum dans le plan perpendiculaire au champ, on a entre le rayon 2R et la distance y du maximum à la trajectoire de la source la relation :

$$2\,R = \frac{y^2 + z_0^2}{y}.$$

La trajectoire issue obliquement au champ qui tombe normalement sur la plaque vient encore la percer au même point (fig. 19).

Les trajectoires dont l'obliquité est comprise entre celles des deux précédentes rencontrent la plaque entre ce point et la trace de la circonférence enveloppe. Si l'on suppose que cette trace correspond au lieu où l'impression est maximum, on en déduirait pour la valeur cherchée du rayon :

$$2\,R = \sqrt{y^2 + z_0^2}.$$

Les deux valeurs $y + \frac{z_0^2}{y}$ et $y + \frac{z_0^2}{2y}$ diffèrent peu si z_0 est petit par rapport à y. L'exemple cité plus haut serait particulièrement défavorable pour une mesure précise. Pour une même valeur de y, les deux formules donneraient des nombres dont la différence varie entre 0,05 et 0,10 de leur valeur.

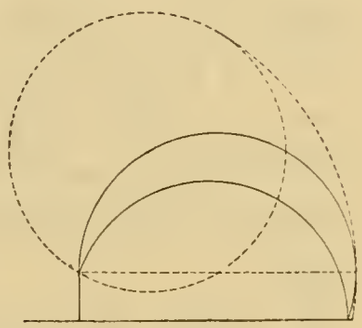


Fig. 19.

La connaissance du rayon de courbure R des trajectoires circulaires est une donnée fondamentale pour l'étude du rayonnement. On vient de voir que l'on a théoriquement $R = \frac{m}{e}\frac{v}{H}$; la valeur de R fournit une des grandeurs qui permettent de calculer $\frac{m}{e}$ et v.

Identité du rayonnement émis par des sels radifères diversement actifs. — Une question qui s'est présentée au début des recherches sur la radioactivité a été de savoir si les sels diversement actifs émettaient tous des rayons de même nature ne différant entre eux que par leur intensité,

ou si la nature des rayons changeait avec l'activité. La première supposition semblait du reste la plus probable, et l'expérience suivante la confirme. M. et Mme Curie m'avaient obligeamment prêté du carbonate de baryum radifère et deux échantillons de chlorure d'activités différentes. Sur une même plaque photographique enveloppée de papier noir, et placée horizontalement entre les pôles de l'électro-aimant, quelques grains de deux préparations différentes ont été disposés côte à côte; entre ces deux sources on interposa un écran perpendiculaire à la fois à la plaque et au champ; on excita alors l'électro-aimant, et, après un temps de pose variable avec les échantillons, on observa, en développant la plaque, que les deux impressions obtenues sur les deux moitiés étaient inégales comme intensité, mais qu'elles présentaient des déviations identiques.

De même que pour l'expérience précédente, celle-ci n'est pas absolument décisive, parce que les limites des impressions sont dues à l'absorption du papier noir; elle prouve seulement que, dans des sources inégalement intenses, il existe des rayons d'intensités différentes, possédant la même déviabilité magnétique.

Trajectoires fermées du rayonnement dans un champ magnétique uniforme. — Les rayons qui se propagent normalement à un champ magnétique décrivent des trajectoires fermées qui les ramènent au point d'émission. On peut constater ce fait par l'expérience suivante :

On dispose horizontalement dans le champ magnétique, comme dans les expériences précédentes, une plaque photographique enveloppée de papier noir, mais la gélatine

étant en dessous; puis très près du bord de la plaque, bord amené au milieu du champ, on place sur la face supérieure une lame de plomb, et sur cette lame la petite cuve décrite plus haut, formant une source de très petit diamètre. On excite alors l'électro-aimant dans le sens convenable pour que le rayonnement soit rejeté au dehors de la plaque, et l'on observe qu'il se produit, sur tout le bord au-dessous de la source, une impression due aux rayons qui y sont ramenés. Si l'on dispose dans l'espace divers écrans sur le trajet des rayons, leur ombre se reproduit sous la plaque montrant que les rayons normaux au champ sont ramenés sous la source elle-même et que les rayons obliques sont ramenés sur l'axe du champ passant par la source.

Enfin, si, à côté de la plaque horizontale, on dispose une plaque verticale dont le plan se prolonge au-dessus et au-dessous de la première, on obtient une section de toutes les trajectoires des rayons qui la rencontrent et l'on reconnaît que ceux-ci sont ramenés sur l'axe qui passe par la source.

L'épreuve reproduite (Pl. VI, fig. 32) a été obtenue en plaçant un grain de radium à l'intersection de deux plaques enveloppées, disposées l'une parallèlement, l'autre perpendiculairement au champ. Elle montre que les rayons efficaces pour produire l'impression sur la plaque, horizontale normalement au champ, sont ceux qui sont émis normalement à la plaque.

On rend compte de tous ces résultats en assimilant le rayonnement déviable à des rayons cathodiques et en considérant ce rayonnement comme soumis à des forces qui sollicieraient des masses d'électricité négative transpor-

tées dans le champ magnétique avec une grande vitesse. Conformément aux considérations exposées ci-dessus, les trajectoires des rayons normaux à un champ uniforme sont des circonférences passant par la source, et tangentes à la direction originelle du rayonnement. Pour un rayonnement homogène, ces circonférences ont toutes le même rayon R dont la valeur $R = \frac{m}{e}\frac{v}{H}$ est inversement proportionnelle à l'intensité H du champ.

Les rayons émis normalement à une plaque photographique par une source située sur cette plaque reviennent couper celle-ci normalement et produisent une impression d'intensité maximum. Les rayons émis tangentiellement à la plaque reviennent sur eux-mêmes tangentiellement et ne produisent sur celle-ci aucune impression.

Pour une direction de propagation oblique, la trajectoire est une hélice qui correspond à l'hélice théorique. Pour un observateur supposé placé de manière à voir le rayon s'éloigner de lui, l'hélice s'enroule dans le sens des aiguilles d'une montre si la propagation a lieu dans le sens du champ, et en sens inverse si la propagation a lieu en sens contraire.

§ 4. — *Dispersion et analyse du rayonnement déviable dans un champ magnétique. Absorption du rayonnement.*

Il résulte de la forme des trajectoires que, si le rayonnement était homogène, l'impression reçue sur la plaque par les rayons qui y sont ramenés devrait présenter un maximum vers le bord le moins dévié et une diffusion de

l'autre côté, et, dans le cas particulier qui nous occupe, une impression maximum du côté opposé à la source. Or, même avec une source de très petit diamètre, les arcs d'ellipse observés sont toujours très diffus vers l'extérieur, et si, en diminuant le champ magnétique, on augmente la valeur du rayon de courbure R, la diffusion augmente au point de couvrir la plaque sur tout un côté.

Cette diffusion est produite par la dispersion du rayonnement qui est bien réellement hétérogène, comme l'indiquaient les expériences antérieures. Une des applications les plus importantes de cette action magnétique est de disperser une partie du rayonnement en rayons inégalement déviables, de même qu'un prisme disperse la lumière en rayons inégalement réfrangibles.

On peut alors analyser le rayonnement dispersé comme on analyse la lumière. On constate qu'il se compose d'une infinité de rayons ayant des trajectoires pour lesquelles la valeur fondamentale de R est différente.

Dans l'hypothèse balistique on a $RH = \frac{m}{e} v$. Si donc nous observons des déviations différentes dans le même champ magnétique, il faut en conclure que, soit la vitesse de propagation v, soit ce rapport $\frac{m}{e}$ de la masse à la charge, soit encore ces deux grandeurs varient d'une radiation à l'autre.

Si l'on dispose dans le champ magnétique une plaque photographique non enveloppée de papier noir, et sur laquelle on dépose une petite cuve de plomb contenant la matière active, puis diverses lames ou bandes de papier

ou de métal formant des écrans absorbants, on observe qu'en rencontrant ces écrans, une partie seulement du rayonnement dévié les traverse; les limites des impressions sous les différents écrans varient avec la nature de ceux-ci et l'épreuve figure de véritables spectres d'absorption. Les rayons les plus déviables sont arrêtés; d'autres donnent une impression sous les écrans en sortant de ceux-ci, et enfin les rayons les plus déviables traversent les écrans et la plaque photographique sans donner d'impression intense. L'épreuve, reproduite (Pl. VI, fig. 34), donne une idée de ces spectres d'un genre nouveau. Elle a été obtenue dans un champ magnétique formé par des parallélipipèdes en fer de 10 centimètres de large sur 14 centimètres de hauteur, séparés par une distance de $3^{c},3$. Le champ uniforme était assez étendu pour comprendre toutes les trajectoires qui pouvaient être ramenées sur la plaque. On faisait passer dans l'électro-aimant un courant de 4 ampères. L'intensité du champ magnétique a-été évaluée à 2 055 unités CGS.

La figure 34 de la Pl. VI est relative aux impressions obtenues sous une bande de papier noir, une bande d'aluminium, de $0^{mm},1$ d'épaisseur et une bande de platine de $0^{mm},3$.

La source était formée de quelques grains de chlorure de radium réunis dans un trou de 1 millimètre percé dans une carte doublée d'une feuille de papier noir, et le tout placé dans une petite cuve rectangulaire en plomb dont le fond avait $0^{mm},945$ d'épaisseur. Lorsque la cuve était posée directement sur la plaque nue, la matière active était à une distance moyenne de $1^{mm},1$ du plan de la plaque.

On remarquera que l'impression au-dessous de la cuve a été très intense et environ trois fois plus large que la source elle-même.

On a réalisé ainsi un grand nombre d'épreuves avec divers écrans. Lorsqu'on expérimentait avec des plaques non enveloppées on disposait les expériences dans une chambre noire en s'éclairant seulement avec de la lumière rouge. On pouvait aussi opérer à la lumière avec une plaque enveloppée de papier noir, mais alors les impressions, au lieu de s'étendre jusque près de la source, par l'effet des rayons les plus déviables non arrêtés par les bords de la cuve, étaient limitées à un arc d'ellipse correspondant aux rayons arrêtés par le papier noir.

Pour relever les valeurs de 2 R correspondantes aux rayons limites arrêtés par divers écrans, on pouvait tracer sur du papier une série d'ellipses concentriques dont les rapports des axes étaient 2 et π et dont les petits axes variaient d'un millimètre de l'une à l'autre. Il suffisait alors de superposer ces ellipses à l'épreuve obtenue.

Cependant, comme dans la disposition ci-dessus, plusieurs radiations émises sous des angles différents peuvent venir impressionner la plaque en un même point, on peut avoir des doutes sur l'attribution d'une impression déterminée à une radiation unique dont la trajectoire aurait un rayon de courbure bien défini.

Cette incertitude n'existe plus si l'on oblige toutes les trajectoires issues d'une source ponctuelle à passer par un même point, qui pratiquement sera un trou percé dans un écran. Par ces deux points il ne passe qu'une seule circonférence de rayon déterminé, et ce rayon sera alors

défini si un troisième point de son parcours, par exemple son point d'arrivée sur la plaque, est connu.

Le faisceau, au sortir du trou, constitue ce que nous appellerons un spectre pur. Si on le reçoit sur une plaque photographique couverte de divers écrans, on obtient une apparence semblable à celle de la figure précédente.

L'épreuve reproduite figure 35, Pl. VI, a été obtenue en posant sur une plaque photographique non enveloppée et placée dans un champ magnétique, la petite cuve qui avait servi aux expériences précédentes, et sous laquelle on avait glissé une petite bande de papier à lettre portant des cales et des repères. La petite cuve était recouverte d'une gouttière en plomb, de $1^{mm},56$ d'épaisseur et de $3^{mm},90$ de hauteur intérieure; un trou de 1 millimètre de diamètre était percé sensiblement au-dessus de la source à une distance de $2^{mm},80$.

Sous la gouttière, les rayons secondaires émis par le plomb ont donné une impression intense et se sont montrés assez peu pénétrants pour donner une reproduction des inégalités du papier.

Les rayons déviés ont atteint la plaque et ont donné, sous des écrans de papier noir et d'aluminium, des impressions à peu près identiques à celles de la figure précédente, la limite d'absorption de l'aluminium correspondant à peu près au maximum de l'impression sous le papier noir. Les positions des maxima d'impression sous les deux écrans, par rapport à la position de la source, sont à peu près les mêmes que dans l'épreuve précédente (A-8-3-00); les différences dans les distances des arcs limites, plus petites dans cette épreuve que dans l'épreuve A-21-3-00,

doivent être attribuées à la plus grande intensité du rayonnement dans cette épreuve, tandis que la portion du rayonnement qui a traversé un trou étroit, avant d'arriver sur la plaque, est relativement petite. La faible intensité oblige également à prolonger la pose qui a été de 80 minutes pour l'épreuve du 21, tandis qu'elle n'avait été que de 30 minutes pour l'épreuve du 8, et encore une pose de 20 minutes est-elle suffisante dans ce cas pour avoir des épreuves très intenses.

Ces diverses considérations ont conduit à se contenter, pour des mesures en quelque sorte qualitatives, de la disposition décrite en premier lieu, et à relever sur les épreuves obtenues avec cette disposition les valeurs des rayons de courbure des trajectoires des rayons qui sont à la limite de l'absorption de divers écrans. On a toutefois corrigé les distances relevées, en tenant compte de la hauteur de $1^{mm},1$ de la source au-dessus de la plaque. On a ainsi trouvé, avec un champ magnétique de 2055 unités CGS environ, les limites suivantes :

SUBSTANCES.	ÉPAISSEURS.	y	R	R H
	mm	c	c	
Papier noir.	0,065	0,75	0,38	781
	0,010	0,40	0,21	431
Aluminium	0,100	1,15	0,58	1 192
	0,200	1,70	0,85	1 746
Mica	0,025	0,60	0,31	637
Verre.	0,155	1,30	0,65	1 335
Platine.	0,030	1,50	0,75	1 541
Cuivre	0,085	2,00	1,00	2 055
Plomb	0,130	3,00	1,50	3 082

Les relevés de plusieurs épreuves conduisent aux valeurs suivantes du produit RH pour les rayons-limites qui provoquent des impressions intenses sous le papier et sous l'aluminium, ainsi que pour les rayons qui produisent l'impression maximum.

		y	R	RH
ÉPREUVE PL. VI, FIG. 33, CHAMP MAGNÉTIQUE H = 4 080				
		c	c	
Papier noir, épaisseur $0^{mm},065$	Limite plus déviable. . .	0,52	0,28	1 140
	Maximum.	0,62	0,35	1 428
	Limite moins déviable. .	0,90	0,48	1 958
ÉPREUVE PL. VI, FIG. 34, CHAMP MAGNÉTIQUE H = 2 055				
Papier noir, épaisseur $0^{mm},065$	Limite plus déviable. . .	0,95	0,48	986
	Maximum.	1,30	0,65	1 335
	Limite moins déviable. .	1,95	1,00	2 055
Aluminium, épaisseur $0^{mm},10$	Limite plus déviable. . .	1,15	0,58	1 192
	Maximum.	1,50	0,75	1 549
	Limite moins déviable. .	2,15	1,08	2 219
AUTRES ÉPREUVES. CHAMP MAGNÉTIQUE H = 2 361.				
Papier noir, épaisseur $0^{mm},065$	Limites. Côté le plus déviable.	0,60	0,31	632
		0,95	0,48	1 133
	Maximum.	1,15	0,58	1 369
	Limites. Côté le moins déviable.	1,45	0,73	1 713
		2,35	1,18	2 786
Aluminium, épaisseur $0^{mm},10$	Limite plus déviable. . .	1,20	0,60	1 416
	Maximum.	1,55	0,78	1 841
	Limites. Côté le moins déviable.	2,00	1,00	2 361
		2,10	1,05	2 479
Aluminium, et papier noir superp.	Limite plus déviable. . .	1,45	0,73	1 713
	Maximum.	1,60	0,80	1 888
	Limite moins déviable. .	2,15	1,07	2 526

Ces nombres ne sont que très grossièrement approchés. Les valeurs relatives au champ de 2361 unités doivent être considérées comme plus exactes, car l'intensité a été mesurée par la méthode électro-magnétique au moment même où l'on a fait l'épreuve photographique. Nous verrons plus loin comment on peut obtenir par une autre méthode les valeurs du produit RH pour les mêmes rayons. Les nombres qui précèdent donnent cependant une idée de l'ordre de grandeur du produit RH et de ses variations dans le faisceau dispersé (1).

§ 5. — *Variation apparente de l'absorption avec la distance des écrans à la source active.*

Au cours de ces expériences, il s'est présenté un phénomène inattendu. On vient de voir que si l'on place sur une plaque photographique, à côté d'une petite cuve contenant du radium, divers écrans formés de bandes de papier, de mica ou de verre, et si l'on ramène sur la plaque le rayonnement de la cuve en le soumettant à l'influence d'un champ magnétique, les impressions s'arrêtent à des distances inégales de la source. S'il n'y a pas d'écran sur la plaque, l'impression se fait jusque dans le voisinage immédiat de la petite cuve, montrant ainsi l'existence de

(1) Dans mes premières publications, le champ magnétique avait été déduit d'une mesure optique de polarisation rotatoire magnétique, dans une direction faisant environ 83° avec le champ. On avait trouvé H = 1740. Or, une erreur de 1° sur l'angle de la direction du rayon polarisé avec le champ conduit à une erreur relative de 0,18 sur la valeur du champ. La mesure électro-magnétique doit être considérée comme beaucoup plus exacte.

rayons très fortement déviés, inégalement arrêtés par les divers écrans dont il vient d'être question.

Mais si, au lieu de placer ces mêmes écrans isolément sur la plaque photographique, on les place sur la petite cuve elle-même qui contient la source active, et s'il n'y a pas d'autre écran sur la plaque, on observe une impression qui s'étend jusque près de la source, comme si l'écran avec lequel on vient de la couvrir n'existait pas. Ce fait a paru général. Il a été observé avec du papier noir et des lames d'aluminium, de cuivre et de plomb d'environ $0^{mm},1$ d'épaisseur.

Les radiations ont leur intensité plus ou moins diminuée par ces écrans, mais quand ceux-ci sont très près de la source, l'impression plus ou moins affaiblie s'étend jusqu'à la source elle-même, montrant qu'il arrive alors sur la plaque des radiations de toute déviabilité, depuis celles qui sont très peu déviées et très pénétrantes jusqu'à celles qui viennent s'arrêter sur le bord même de la cuve.

Il semble alors que chaque écran se laisse traverser par les radiations qu'il arrête lorsqu'il est posé sur la plaque.

Au lieu de placer les écrans sur la cuve elle-même on peut couvrir celle-ci d'une petite gouttière cylindrique plus ou moins épaisse. Dans ces conditions l'aluminium sous $0^{mm},20$ d'épaisseur a transmis des radiations bien plus déviables que celles qui sont arrêtées par la même épaisseur du métal posé sur la plaque. Une épaisseur de plomb de $0^{mm},33$ a arrêté la partie très déviable du rayonnement. L'épreuve reproduite (Pl. VI, fig. 36) est relative à l'expérience faite avec l'aluminium et peut être comparée avec la figure précédente (A-21-3-00, Pl. VI, fig. 34).

L'effet n'est pas dû à ce que l'écran n'est plus en contact avec la plaque photographique, car deux lames d'aluminium de $0^m,1$ d'épaisseur, parallèles toutes deux à la plaque photographique l'une posée sur la gélatine l'autre à 2 millimètres au-dessus, ont donné la même absorption qualitative.

Si l'on dispose trois lames d'aluminium d'égale épaisseur, l'une sur la plaque, l'autre inclinée à 45°, et la troisième verticale, toutes trois s'approchant très près de la source, on constate que pour ces trois plaques la limite des radiations qui impressionnent la plaque photographique se rapproche progressivement de la source.

J'ai vérifié cette variation dans l'absorption apparente des écrans avec leur distance à la source par des observations de phosphorescence. M. et Mme Curie, ainsi que MM. Meyer et v. Schweidler l'ont également vérifiée par des expériences électriques. Le phénomène est différent de celui qui a été observé par M. et Mme Curie pour les rayons α du radium et pour les rayons du polonium, car ces rayons sont d'une autre nature.

On verra plus loin comment on peut reconnaître que certains rayons, partiellement absorbés, provoquent une émission de rayons secondaires à leur sortie des écrans partiellement transparents tels que l'aluminium. Ces rayons secondaires sont plus déviables et moins pénétrants que les rayons excitateurs; ils se substituent aux rayons arrêtés par l'écran et si celui-ci est assez près de la source, leur intensité est telle qu'ils ne paraissent pas différer des rayons qui seraient issus de la source et auraient été transmis sans absorption. Dans le cas de surfaces cylindriques, ces nouveaux rayons, normaux à la surface, semblent

provenir d'un point de l'axe de ces surfaces. On verra également que cette substitution n'a lieu que pour les rayons très déviables et qu'une très grande partie du rayonnement traverse sans modification les écrans métalliques. Nous traiterons ce point avec quelques détails dans l'un des chapitres suivants.

Le phénomène de la variation de l'absorption avec la distance à la source n'est donc qu'une apparence due à la production de rayons secondaires qui ont toutes les propriétés des rayons arrêtés et auxquels ils se substituent.

Un petit tube de verre contenant du radium émet des rayons de toute déviabilité, rayons dont une notable partie est un rayonnement secondaire excité dans le verre du tube, et qui pourrait être partiellement arrêté par un second tube de verre semblable au premier.

II. — PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES PRODUITS PAR LE RAYONNEMENT DU RADIUM

Les mesures relatives à la déviation magnétique avaient conduit à des valeurs des rayons de courbure des trajectoires, tout à fait du même ordre que celles qui avaient été observées pour les rayons cathodiques par M. J. J. Thomson, par M. Wien et par M. Lenard. Pour compléter l'identification des deux natures de rayonnement, il y avait deux autres vérifications à effectuer; l'une était de constater que le rayonnement transporte des charges électriques négatives, l'autre qu'il est dévié dans un champ électrique. M. et Mme Curie ont mis en évidence le phénomène du transport de charges électriques et ont mesuré

ces charges et, d'un autre côté, j'ai pu réaliser et mesurer la déviation dans un champ électrique.

§ 1. — *Charge électrique du rayonnement du radium. Expériences de M. et Mme Curie* (1).

Nous devons nous borner à rappeler ici la belle expérience de M. et Mme Curie. On sait, d'après les expériences de M. Perrin, que les rayons cathodiques sont chargés d'électricité négative. M. Perrin et M. Lenard ont montré en outre que ces rayons peuvent transporter leur charge à travers des enveloppes métalliques réunies à la terre, et à travers des lames isolantes. Aux points où les rayons cathodiques sont absorbés il se produit un dégagement d'électricité négative.

M. et Mme Curie ont constaté que le rayonnement déviable du radium jouissait des mêmes propriétés, et transportait des charges négatives.

Toutes les expériences faites dans l'air n'ont donné d'autre résultat que d'établir des courants dus à la différence de potentiel de contact des métaux; l'air rendu conducteur dissipe les charges recherchées. Pour les mettre en évidence il faut, soit entourer d'une enveloppe isolante continue les corps qui doivent recueillir les charges, soit les placer dans un tube où l'on a fait un vide très parfait.

L'expérience a été réalisée en entourant un disque conducteur ainsi que les fils qui le reliaient à l'électro-

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 640 (5 mars 1900).

mètre, avec une couche continue de paraffine recouverte elle-même d'une enveloppe métallique en communication avec la terre. Sur la face du disque qui devait être exposée au rayonnement la couche isolante, formée de paraffine ou d'ébonite, était très mince et recouverte d'une feuille d'aluminium de $0^{mm},01$ d'épaisseur. Si l'on expose ce système au rayonnement du radium, les rayons traversent l'enveloppe métallique et la paraffine, et le disque devient le siège d'un dégagement continu et constant d'électricité négative que M. et Mme Curie mesuraient avec leur quartz piézoélectrique.

Le courant ainsi créé est très faible. Avec du chlorure de baryum radifère très actif formant une couche de $2^{cm^2},5$ de surface et de $0^c,2$ d'épaisseur on obtient un courant de l'ordre de 10^{-11} ampère, les rayons utilisés ayant traversé, avant d'être arrêtés par le disque métallique, une épaisseur d'aluminium de $0^{mm},01$ et une épaisseur d'ébonite de $0^{mm},3$.

Les résultats ont été les mêmes en employant des disques en plomb, en cuivre et en zinc, et, pour l'isolement, de la paraffine ou de l'ébonite.

Le courant diminue quand on éloigne la source radiante, ou quand on emploie un produit moins actif.

Enfin, M. et Mme Curie ont réalisé l'expérience inverse en enfermant au milieu de la matière isolante l'auge en plomb contenant la matière active; celle-ci était en relation avec l'électromètre, et le tout était enveloppé par une enceinte métallique reliée à la terre. Dans ces conditions le radium prend une charge positive égale en grandeur à la charge négative de la première expérience. Les rayons du radium

traversent la matière isolante mince et quittent le conducteur intérieur en emportant des charges négatives.

Dans cette expérience, les rayons α du radium sont arrêtés par la substance isolante.

Les rayons du polonium n'ont manifesté aucune charge, mais comme ils sont arrêtés par la matière isolante on ne peut tirer de cette expérience aucune conclusion.

M. Curie a fait remarquer qu'un échantillon de radium qui serait isolé électriquement d'une façon parfaite se chargerait en peu de temps à un potentiel extraordinairement élevé. Dans l'hypothèse balistique ce potentiel augmenterait jusqu'à ce que la différence du potentiel avec les corps environnants devienne suffisante pour empêcher l'éloignement des particules électrisées émises et amener leur retour à la source radiante.

Pratiquement, lorsqu'un sel de radium est enfermé dans un tube scellé, il se charge d'électricité positive, et en l'ouvrant, M. et Mme Curie ont observé parfois une petite étincelle. Parfois aussi la charge intérieure peut provoquer une étincelle qui perce le tube.

§ 2. — *Déviation électrique du rayonnement du radium.*

Au moment où j'ai publié des mesures relatives à la déviation magnétique d'une partie du rayonnement du radium, en signalant l'identité des rayons de courbure observés pour les trajectoires avec ceux des trajectoires des rayons cathodiques, j'ai indiqué (1) les conditions dans

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 206 (29 janvier 1900).

lesquelles ce même rayonnement devait être dévié par un champ électrique. On pouvait prévoir que pour des rayons caractérisés par un produit RH = 1500, en admettant que le rapport $\frac{e}{m}$ et la vitesse fussent les mêmes que pour les rayons cathodiques, on devait avoir une déviation de 2 millimètres environ par centimètre de trajet pour un champ de $2,10^{12}$ unités électromagnétiques CGS. J'ai bientôt confirmé, par l'expérience (1), ce résultat prévu.

Dans l'intervalle de ces deux publications M. E. Dorn (2) a annoncé qu'il avait observé qualitativement le phénomène. Il s'appuyait du reste sur les résultats et les considérations de ma première note pour estimer le déplacement d'un large faisceau illuminant un écran phosphorescent, et, dans sa publication, M. Dorn dit avoir aperçu un déplacement qui lui a paru être de l'ordre de grandeur et du sens prévus.

A cette époque j'avais obtenu de mon côté, sur des plaques photographiques, des déplacements très nets montrant que le faisceau était dévié par un champ électrique dans le sens que suivrait une masse négative. Peu après je pus observer ces déplacements pour des régions à peu près définies du faisceau déviable et faire les premières mesures quantitatives qui aient établi l'identité entre le faisceau dévié et les rayons cathodiques.

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 809 (26 mars 1900).

(2) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 1126 et *Abhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft zu Halle* (11 mars 1900).

Après plusieurs essais pour obtenir dans le vide des champs électriques très grands sans toutefois produire des Rayons X qui auraient voilé les plaques photographiques, je suis d'abord revenu à une disposition essayée plusieurs mois auparavant, tout au début de ces recherches sur la déviation magnétique, et qui, perfectionnée, a manifesté le phénomène de la déviation électrique avec beaucoup de netteté dans l'air et à la pression atmosphérique.

La disposition consistait essentiellement à faire passer un faisceau très étroit de radiations entre deux petits plateaux électrisés, et à recevoir le faisceau sur une plaque photographique enveloppée de papier noir. Des fils métalliques fins placés en avant de la plaque donnaient sur celle-ci, par leur ombre, des repères précis. On constata alors que le faisceau émané du radium était repoussé par le plateau électrisé négativement, ce qui est conforme à l'existence de charges négatives transportées au travers du champ. La diffusion du faisceau dans l'air est augmentée par la dispersion qui se produit dans le champ électrique comme dans le champ magnétique et pour la même cause qui est l'hétérogénéité du rayonnement.

En renversant le sens du champ les déplacements sont inverses, et, en couvrant successivement une partie de la plaque par un écran opaque de manière à masquer une moitié du faisceau perpendiculairement à sa déviation, on peut obtenir sur la même épreuve deux déviations de sens contraires.

Le faisceau diffusé et dispersé ne se prête à des mesures qu'à la condition de déterminer la trace de radiations

bien définies. Cette difficulté a conduit à employer la disposition suivante :

Deux petits plateaux rectangulaires de $3^c,45$ de hauteur ont été disposés verticalement et fixés par de la paraffine, de façon à laisser entre eux un intervalle d'air de 1 centimètre d'épaisseur. Dans cet intervalle le champ électrique était mesuré sensiblement par la différence de potentiel des plateaux évaluée en unités CGS. L'un des plateaux était à à la terre, l'autre était en relation avec une batterie de six grandes jarres dont la capacité réduisait considérablement la vitesse de la chute de potentiel des plateaux sous l'influence du radium. Un électromètre à cadran de Henley, en relation avec la batterie, avait été gradué par l'observation de diverses distances explosives de façon à donner approximativement le potentiel de la batterie. Pendant l'expérience, le potentiel était maintenu constant en rechargeant continuellement la batterie avec une machine à influence, et en faisant en sorte que la déviation de l'électromètre se maintînt constante. Une disposition convenable permettait, au cours d'une expérience, de renverser le champ électrique entre les plateaux, en lui conservant la même intensité.

Dans ces premières expériences la machine à influence (machines de Wimhurst) était tournée à la main ; plus tard on la remplaça par une machine du même genre mise en mouvement par un petit moteur.

La plaque photographique, enveloppée de papier noir, était fixée en dehors du champ à $1^c,2$ au-dessus des arêtes supérieures des plateaux ; la matière radioactive était disposée au-dessous du champ. Dans une première série

d'expériences, la matière active était placée dans une petite cuve de plomb surmontée d'une lame de plomb dans laquelle était pratiquée une fente rectiligne de $1^{mm},5$ environ de large; dans une autre série le sel de radium était rassemblé dans une rainure rectiligne de 1 millimètre de large pratiquée dans un petit bloc de plomb; le tout était orienté de manière que la partie moyenne du faisceau coïncidât à peu près avec un plan parallèle aux plateaux et à égale distance de ceux-ci.

Le faisceau large et diffus ainsi obtenu est dévié par le champ électrique, mais la déviation qui correspond sur la plaque photographique à un déplacement de quelques millimètres est difficile à mesurer.

On a disposé alors, exactement au-dessus du milieu de la source linéaire, un écran plat très mince en mica, recouvert ou non d'étain dans les diverses expériences, et très bien isolé. Cet écran qui dépassait les limites du champ, et s'approchait très près de la plaque photographique à laquelle il était normal, donnait sur celle-ci une ombre rectiligne très étroite si le faisceau des radiations actives était bien parallèle à son plan, condition réalisée quand les deux plateaux étaient au même potentiel.

Au contraire, si le faisceau est dévié dans un sens, une partie du faisceau est arrêtée par l'écran, et celui-ci projette sur la plaque une ombre dont la direction indique le sens de la déviation; la limite de cette ombre portée correspond à la déviation de ceux des rayons les moins déviés par le champ électrique qui donnent encore une impression notable au travers du papier noir. Cette limite est diffuse en raison de la pénombre due à la largeur de

la source et surtout en raison de la dispersion du rayonnement par le champ électrique. Si l'on rènverse le sens du champ, l'ombre est projetée en sens contraire. La figure 47, Pl. VII, reproduit l'un des dispositifs employés.

Deux bandes de verre servant d'écran, reliées entre elles par deux autres et mobiles dans une glissière, pouvaient couvrir successivement chacune des moitiés de la plaque photographique, leurs positions successives se rejoignant suivant une ligne parallèle à la déviation. On pouvait faire ainsi sur la même plaque deux impressions correspondant à des sens inverses du champ électrique. L'épreuve montre alors deux bandes claires décalées l'une par rapport à l'autre, images de l'ombre projetée par l'écran dans deux sens opposés à partir d'une origine commune.

La figure 48, Pl. VI, reproduit une de ces épreuves relative à un champ de $1{,}02.10^{12}$ unités CGS. (10200 volts entre deux plateaux distants de 1 centimètre).

Les dimensions de l'appareil étaient les suivantes :

Projection normale au champ du chemin parcouru dans le champ $l = 3^c{,}45$; projection normale au champ du chemin parcouru par le rayon en dehors du champ avant d'atteindre la plaque photographique enveloppée de papier noir, $h = 1^c{,}2$.

Trajectoire d'une particule électrisée dans un champ électrique. — Considérons un champ électrique d'intensité F; et une masse m transportant une charge e avec une vitesse v. Soit α l'angle de la vitesse avec la direction du champ.

Supposons le champ parallèle à l'axe des x, et la masse électrisée ayant une vitesse initiale v_0 dans le plan des $x\ z$.

L'accélération étant constante, dirigée suivant l'axe des x, et égale à $\frac{eF}{m}$, on a d'après les formules connues

$$z = v_0 t \sin \alpha$$

$$x = \frac{1}{2} \frac{eF}{m} t^2 + v_0 t \cos \alpha$$

éliminant t, on trouve facilement l'équation d'une parabole.

Dans le cas où $\alpha = 90°$ l'équation de la parabole devient

$$z^2 = 2 \frac{m v_0^2}{eF} x.$$

La vitesse est variable à chaque instant et elle a pour expression

$$v^2 = \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = v_0^2 + \left(\frac{eFz}{mv_0}\right)^2$$

Si, d'autre part, on connaît la déviation magnétique du rayon ayant la même masse m, la même charge e, et la même vitesse v_0, en appelant R le rayon de courbure de la trajectoire dans le champ magnétique H, on a vu que l'on avait pour $\sin \alpha = 1$,

$$RH = \frac{m}{e} v_0,$$

les formules deviennent

$$z^2 = \frac{2RHv_0}{F} x \quad \text{et} \quad v^2 = v_0^2 + \left(\frac{Fz}{RH}\right)^2$$

La connaissance de RH et de la déviation électrique permettent donc de déterminer v_0 et par suite $\frac{m}{e}$.

Dans le cas de l'expérience ci-dessus, au sortir du champ électrique dont la hauteur était l, la trajectoire suivait la tangente pour atteindre la plaque photographique située à une hauteur h au-dessus des plateaux électrisés fig. 20.

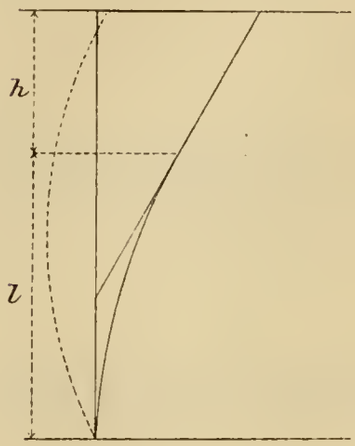


Fig. 20.

(On néglige les perturbations dues à la distribution du champ en dehors dans le voisinage immédiat de la sortie.)

La déviation δ' au sortir du champ est donnée par

$$\delta' = \frac{Fl^2}{2RHv_0},$$

Or comme la trajectoire en ce point coupe la tangente à l'origine, au milieu de la hauteur du champ, on a :

$$\frac{\delta}{\delta'} = \frac{\frac{l}{2} + h}{\frac{l}{2}} \qquad \text{et} \qquad \delta = \left(\frac{l}{2} + h\right)\frac{Fl}{RHv_0},$$

d'où

$$v_0 = \left(\frac{l}{2} + h\right)\frac{Fl}{RH\delta}.$$

Pour obtenir l'épreuve précédente et d'autres analogues on avait $l = 3^c,45$, $h = 1^c,2$ et $F = 1,02.10^{12}$.

La plus grande difficulté qu'on ait rencontrée est de pouvoir déterminer la déviation δ qui correspond à une valeur déterminée du produit RH dans le champ magnétique. Dans ce but on a fait plusieurs épreuves en inter-

posant une lame d'aluminium, sur une partie du faisceau, et tout contre la plaque. L'une de ces épreuves est reproduite fig. 49, Pl. VII. On doit observer que le bord le plus dévié de l'ombre correspond aux rayons les moins déviés par le champ électrique, et que, si l'écran vertical ne touche pas la plaque, le bord intérieur est formé par l'impression des rayons les plus déviés dont les trajectoires sont de l'autre côté de l'écran vertical (fig. 20). En examinant ce bord intérieur on reconnaît que la limite des rayons les plus déviables s'étend plus loin au travers du papier qu'au travers de l'aluminium et du papier superposés. Les rayons les plus déviés dans le champ magnétique sont donc aussi ceux qui sont le plus déviés dans le champ électrique.

Si l'on mesure la déviation δ pour la limite des ombres projetées dans les deux sens, on trouve pour l'ombre au travers du papier, $\delta = 0^c,24$ environ, et au travers de l'aluminium et du papier superposés $\delta = 0^c,32$. La différence paraît due à l'affaiblissement de l'intensité du rayonnement au travers de l'aluminium.

Pour mieux comparer les déviations électriques et magnétiques, on a disposé dans un champ magnétique de 190,6 unités CGS, un appareil semblable à celui qui vient d'être décrit, avec un écran plan vertical au-dessus d'une source linéaire située à $3^c,22$ au-dessous d'une plaque photographique horizontale enveloppée de papier noir et partiellement couverte d'aluminium. La déviation magnétique du rayonnement donne lieu à une ombre portée, et l'intensité du champ avait été choisie pour que l'ombre fût à peu près semblable à celle qu'on obtient dans le champ électrique.

En outre, comme la source elle-même est dans le champ magnétique, les parties radiantes qui ne sont pas immédiatement au contact de l'écran décrivent des trajectoires circulaires qui viennent toucher tangentiellement l'écran un peu au-dessus de la source. On a tenu compte de cette petite correction dans le calcul des rayons de courbure des trajectoires au moyen de la déviation. On a ainsi obtenu, pour une limite de l'ombre portée qui a paru semblable à celle que l'on avait déterminée dans le champ électrique au moyen du papier noir, la valeur $\delta = 0^c,341$.

La largeur de la source linéaire du côté de l'ombre portée était environ $0^c,05$.

On a déduit de ces données la valeur : $RH = 1791$.

Si l'on adopte pour la déviation électrique $\delta = 0^c,24$, on déduit de ces nombres :

$$v = 2,37.10^{10} \quad \text{et} \quad \frac{e}{m} = 1,32.10^{7}.$$

Ces valeurs se trouvent voisines de celles qui ont été obtenues dans une série d'expériences beaucoup plus précises par M. Kaufmann et dont nous parlerons ci-après.

Dans les premières valeurs que j'avais indiquées (1) j'avais admis en nombre rond $RH = 1600$, pour la région limite du maximum d'impression, et j'avais adopté $\delta = 0^c,4$ pour la déviation électrique correspondante. On en déduisait

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 810 (26 mars 1900).

$v = 1{,}6.10^{10}$ et $\frac{e}{m} = 10^7$. Ces nombres paraissent devoir être considérés comme trop petits tous les deux.

On verra plus loin toute l'importance qu'il y avait à obtenir des mesures plus précises et plus étendues. Cependant l'expérience qui précède a eu l'avantage de démontrer pour la première fois l'existence de la déviabilité électrique, de déterminer l'ordre de grandeur du phénomène, et enfin d'achever la démonstration de l'identité du faisceau déviable en question avec les rayons cathodiques.

J'avais encore déduit de ces expériences la conclusion suivante. Un rayon se propageant dans le sens des lignes de force du champ aura sa vitesse accélérée ou retardée suivant le sens de la propagation. Si la vitesse et la direction du champ (sens du déplacement d'une masse positive) sont de sens contraires, et si la charge e est négative on a :

$$x = \frac{1}{2}\frac{e}{m}\mathrm{F}t^2 + v_0 t \qquad \text{et} \qquad \frac{dx}{dt} = \frac{e}{m}\mathrm{F}t + v_0$$

comme le temps t est très petit on peut négliger le terme en t^2 et l'on a sensiblement $x = v_0 t$. Pour $x = 1^c$, $t = \frac{1}{v_0}$ et

$$v = v_0 + \frac{e\mathrm{F}}{m}\frac{1}{v_0} = v_0 + \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{RH}} = v_0\left(1 + \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{RH}v_0}\right) = v_0 . 1{,}023.$$

Cette faible augmentation de vitesse n'a pas été jusqu'ici mise nettement en évidence, bien que M. Dorn ait cru pouvoir lui attribuer l'observation d'une augmentation

de la phosphorescence produite par les rayons d'une substance radioactive lorsqu'on créait un champ électrique parallèle à leur direction, et dirigé en sens inverse.

En combinant les valeurs trouvées pour $\frac{e}{m}$ et pour v, avec la valeur de la charge transportée par le rayonnement dont M. et Mme Curie ont donné l'ordre de grandeur, on pouvait avoir une idée de l'ordre de grandeur de l'énergie correspondante.

Ce calcul ne s'applique qu'à un rayonnement fictif qui serait homogène, c'est-à-dire formé tout entier de rayons ayant la même déviabilité, et que l'on supposerait en outre transporter toute la charge négative observée. Cette hypothèse est loin de la réalité; même en ne considérant que les rayons déviables, ceux-ci sont formés d'une infinité de rayons dans lesquels les vitesses et les masses calculées sont différentes.

D'après M. et Mme Curie, la quantité d'électricité émise pendant une seconde, par un centimètre carré d'une de leurs préparations radiantes, sous une épaisseur de $0^c,2$, serait de l'ordre de 4.10^{-13} unités CGS. Soit N le nombre des particules électrisées on aurait $Ne = 4.10^{-13}$. Or pour le rayon caractérisé par

$$v = 2,37.10^{10},$$

et

$$\frac{e}{m} = 1,32.10^{7},$$

ou

$$RH = 1791.$$

On aurait

$$\frac{m}{e} v^2 = \mathrm{RH}\, v = 4{,}47 . 10^{13},$$

Multipliant par

$$\frac{1}{2} \mathrm{N} e = 2{,}10^{-13},$$

il vient :

$$\frac{1}{2} \mathrm{N} m v^2 = 8{,}9 \text{ unités CGS d'énergie.}$$

On peut encore calculer la masse $\mathrm{N}m = \mathrm{N}e.\left(\frac{m}{e}\right)$; celle-ci correspondrait à un déplacement de matière de $3{,}5.10^{-20}$ par seconde, c'est-à-dire à près de 1 milligramme en un milliard d'années.

Cette évaluation ne comprend pas les pertes d'énergie par d'autres phénomènes, pertes qui sont au moins d'un ordre mille fois plus grand. Mais, même s'il existait des émissions matérielles mille fois plus considérables, nos procédés de mesure actuels ne les mettraient pas en évidence.

Déterminations simultanées de la déviation électrique et de la déviation magnétique pour un même rayon. — Les considérations qui précèdent montrent toute l'importance qui s'attache à la connaissance précise des déviations électriques et magnétiques d'une série de rayons bien déterminés. Les déductions qu'on peut en tirer touchent à la nature elle-même des radiations que nous pouvons appeler dès lors « cathodiques », car leur assimilation avec ces radiations ne fait plus de doute. Si l'on peut appliquer à ces radiations les considérations déduites de la théorie balistique, c'est-à-dire calculer $\frac{m}{e}$ et v, comme le produit

$RH = \frac{m}{e} v$ est essentiellement variable d'une radiation à une autre, puisque le faisceau présente dans le champ magnétique une dispersion considérable, il est important de savoir si les deux facteurs $\frac{m}{e}$ et v sont tous deux variables, ou si un seul des deux varie.

Les déterminations faites sur les rayons cathodiques par MM. J.-J. Thomson, Lenard et Kaufmann, puis l'application de la théorie de M. Lorentz à l'expérience de M. Zeeman, les déterminations de M. Lenard relatives à l'émission provoquée par les rayons ultra-violets, conduisent toutes à des valeurs du rapport $\frac{e}{m}$ qui sont du même ordre et diffèrent peu les unes des autres. Certains physiciens ont pensé que ce rapport était peut-être constant, ou peu variable. S'il en était ainsi, les valeurs de la vitesse, pour des rayons peu déviables, tels que ceux dont la valeur de RH dépasse 9000, atteindraient le triple de la vitesse de la lumière. Or, d'autres physiciens ont pensé que la vitesse ne pouvait dépasser celle de la propagation des perturbations électro-magnétiques, c'est-à-dire la vitesse de la lumière; il faut donc, s'il en est ainsi, que $\frac{m}{e}$ et v soient tous deux variables, et l'expérience seule peut nous renseigner sur ces variations.

On est ainsi amené à déterminer pour des radiations bien définies les déviations électriques et magnétiques, et comme l'identification de deux rayons dans deux expériences séparées offre l'incertitude qui a été signalée

plus haut, il importait d'exécuter les deux mesures simultanément sur un même rayon.

Dès l'origine de mes recherches, j'avais essayé de faire des déterminations de cette nature en produisant un champ électrique et un champ magnétique parallèles. Les déviations sont alors croisées, et on devait pouvoir relever sur les plaques photographiques un spectre oblique dont chaque point aurait pour coordonnées, parallèles et perpendiculaires au champ, les déviations électriques et magnétiques cherchées.

La diffusion des rayons dans l'air, la nécessité d'avoir un faisceau très fin pour obtenir une courbe sur laquelle on pût faire des mesures, la faiblesse des impressions produites par ce faisceau linéaire obligeant à des poses de plusieurs jours, la nécessité de maintenir constante pendant un temps aussi long une différence de potentiel considérable entre les plateaux constituant le champ électrique, et l'insuffisance des ressources de mon laboratoire ne m'avaient pas encore permis de mener à bien cette détermination, lorsque M. Kaufmann, avec une très grande habileté, exécuta l'expérience dans le vide.

La disposition, très délicate à réaliser était simple en principe. Un champ électrique produit dans le vide, et superposé à un champ magnétique parallèle était traversé par un faisceau issu d'un grain de matière active. Ce faisceau, limité par un trou étroit au sortir du champ électrique, était reçu sur une plaque photographique enveloppée d'une mince feuille d'aluminium. Au bout d'un jour et demi à deux jours on changeait le sens du champ électrique et on laissait la pose se prolonger pendant une

période de temps égale à la première. On observait alors, en développant la plaque photographique avec des précautions convenables, deux courbes, symétriques par rapport à la déviation magnétique, et dont la distance donnait le double de la déviation électrique.

M. Kaufmann a résumé ses mesures dans trois publications. Les deux premières (1) sont relatives à des relevés faits sur une bonne épreuve photographique de l'expérience qui vient d'être décrite. Ceux-ci, confirmés par l'examen d'autres épreuves, mettaient hors de doute la variation régulière du rapport $\frac{e}{m}$ en même temps que celle de la vitesse v.

Dans une publication récente (2), M. Kaufmann a donné de très bonnes mesures exécutées sur quatre nouvelles épreuves photographiques obtenues avec un champ magnétique de 200 unités CGS, un champ électrique voisin de $5{,}2.10^{12}$, et qui réalisaient des déviations électriques et magnétiques atteignant 5^{mm}.

Les valeurs déduites des relevés faits sur les différentes épreuves et de l'application de la théorie balistique, ne sont pas absolument concordantes en raison de l'influence des nombreuses causes d'erreur sur l'exactitude des

---

(1) Nachrichten der K. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Math. Phys. Kl. 1901. Heft. 2 « *Die magnetische und electrische Ablenkbarkeit der Becquerelstrahlen, und die scheinbare Masse der Electronen* », 8 nov. 1901. — et *Ibid.* 1902. Heft. 5. « *Ueber die elektromagnetische Masse des Elektrons* », 26 juillet 1902.

(2) Même recueil, 1903. Heft 3. « *Ueber die electromagnetische Masse der Elektronen* », 7 mars 1903.

nombres calculés. Cependant, en traçant, pour chaque plaque photographique, des courbes des valeurs de $\frac{e}{m}$ en fonction de v, et en prenant les moyennes des valeurs déduites des tableaux publiés par M. Kaufmann, on obtient les nombres suivants, qui diffèrent très peu de ceux qui ont été relevés directement sur la plaque photographique n° 19 (tableau III de M. Kaufmann).

VALEURS MOYENNES
DÉDUITES DES EXPÉRIENCES DE M. KAUFMANN

RH.	$v.\ 10^{-10}$.	$\frac{e}{m}.\ 10^{-7}$.
5 581	3,120	0,559
4 197	2,917	0,695
3 371	2,815	0,835
2 813	2,726	0,969
2 443	2,602	1,065
2 153	2,491	1,157
1 764	2,278	1,291

Les nombres extrêmes sont moins bien déterminés que les autres. On remarquera, en particulier, que la vitesse calculée pour les rayons les moins déviables est supérieure à la vitesse de la lumière. Il n'est pas démontré que ce résultat corresponde à la réalité et ne soit pas dû à des erreurs d'expérience, bien que trois épreuves sur cinq aient donné la valeur inscrite dans le tableau ci-dessus.

Il résulte donc de ces expériences que la valeur du

rapport $\frac{e}{m}$ calculé par les formules de la théorie balistique, est une fonction de la vitesse v.

Ce fait une fois constaté, on peut aller plus loin dans les conceptions théoriques et se demander si la masse m ainsi calculée n'est pas, en partie du moins, apparente.

En effet, si la masse en mouvement représente un élément de courant d'intensité i, défini par $ids = ev$, tout phénomène qui tendra à changer la vitesse fera varier i, et comme toute variation de i provoque des phénomènes d'induction qui tendent à s'opposer à cette variation, c'est-à-dire au changement de v, on voit que l'existence d'une charge en mouvement crée une sorte d'inertie particulière de nature électromagnétique, qui augmentera la valeur de la masse m, si elle ne constitue pas cette masse toute entière.

Dans la première publication citée plus haut, M. Kaufmann, appliquant à ses premières mesures un calcul théorique de M. Scarle, avait conclu que la masse calculée comportait une partie *apparente* qui, pour les vitesses petites par rapport à celle de la lumière, pouvait atteindre le tiers de la partie réelle, et qui, pour les rayons les plus rapides, surpassait notablement la masse réelle.

Dans la seconde et surtout dans la troisième publication, M. Kaufmann a appliqué à ses déterminations une théorie de M. M. Abraham et il a reconnu qu'en supposant la masse m entièrement de nature électromagnétique, les formules de M. Abraham permettaient de calculer des déviations électriques et magnétiques dont les différences avec les nombres observés étaient voisines de 0,01 et ne dépassaient pas généralement 0,05 de leur valeur, c'est-à-

dire l'ordre de grandeur des erreurs expérimentales. La conclusion de M. Kaufmann est que, aussi bien pour les rayons déviables du radium que pour les rayons cathodiques, la masse des électrons est purement électromagnétique.

III. — RAYONS CHARGÉS POSITIVEMENT OU RAYONS α.

On a vu antérieurement que j'avais reconnu dans le rayonnement du polonium une espèce particulière de rayons, d'une nature différente de celle des rayons déviables du radium. Ces rayons ont pour caractères d'être extrêmement absorbables et de ne pas paraître déviés dans les champs magnétiques avec lesquels on avait expérimenté. Peu après, M. et Mme Curie observèrent dans le rayonnement du radium l'existence simultanée de rayons déviables et de rayons ayant la plus grande analogie avec ceux du polonium.

On a vu aussi que le thorium émettait les deux espèces de rayons.

Dans l'étude que nous avons analysée, M. Rutherford avait observé qu'une partie du rayonnement de l'uranium très active, pour ioniser l'air, était éminemment absorbable et il avait appelé cette partie, les rayons α. Pour les raisons signalées ci-dessus, je ne pense pas que cette partie absorbable du rayonnement de l'uranium soit de la nature des rayons du polonium. En étudiant la partie réputée non déviable du rayonnement du radium, M. Rutherford l'a désignée également sous le nom de *rayons* α. Nous adopterons cette dénomination commode, sauf la réserve faite pour l'uranium.

Déjà M. Strutt (1) avait émis l'idée que les rayons α étaient formés de particules chargées positivement. La même conception avait été avancée par Sir W. Crookes (2).

Les expériences signalées plus haut conduisent également à la même conclusion.

Rayons α du radium. — Après avoir été indirectement amené (3) à adopter cette manière de voir, M. E. Rutherford se proposa de rechercher si les rayons α du radium n'étaient pas déviables dans un champ magnétique très intense. Les expériences antérieures prouvaient déjà qu'ils ne pouvaient l'être que très faiblement.

M. Rutherford disposa l'expérience de la manière suivante (4) :

Au fond d'une petite boîte rectangulaire de 37^{mm} sur 7 millimètres était placée une couche d'une préparation radifère; au-dessus, à des distances qui ont été de 14 et de 8,5 millimètres se trouvaient une série d'écrans verticaux de 37 ou de 45 millimètres de hauteur, dont le nombre a varié de 20 à 35, formant autant de fentes au travers desquelles le rayonnement du radium pouvait arriver jusqu'à l'intérieur de la cage d'un électroscope à feuille d'or dont on déterminait la perte de charge en fonction du temps. Si l'appareil était placé dans un champ magnétique intense parallèle aux écrans, le rayonnement déviable était rejeté en totalité sur ceux-ci, et le rayonnement α passait seul.

---

(1) *Phil. Trans Royal Soc.*, 1900.

(2) *Proced. Roy. Soc.*, 1902.

(3) *Phil. mag.*, janv. 1903, p. 113.

(4) *Phil. mag.*, févr. 1903, p. 177 et *Physikalische Zeitschrift.*, 1903, n° 8, p. 235.

On pouvait s'en assurer en constatant son absorption par une très mince feuille de mica.

Pour déceler l'existence d'une déviabilité du rayonnement transmis, chacun des espaces laminaires entre les écrans, distants entre eux de $0^{mm},42$ ou de $0^{mm},55$, dans les différents appareils, était couvert à moitié par un écran opaque comme l'indique la figure ci-contre (fig. 20 *bis*) : il en résulte que si, par l'effet du champ magnétique, le rayonnement est rejeté vers B, il passera dans la cage de l'électroscope, et si, au contraire, il est rejeté vers A, il sera arrêté. Or, l'expérience a montré que la vitesse de la chute des feuilles d'or était différente suivant le sens de l'aimantation, mais les rayons actifs pénètrent dans l'électroscope quand les rayons déviables ordinaires, de nature cathodique, que M. Rutherford appelle les rayons β, sont rejetés vers A, tandis que les rayons α sont arrêtés quand les rayons β sont rejetés sur B.

Fig. 20 *bis*.

M. Rutherford en a conclu que les rayons α sont déviés en sens contraire des rayons cathodiques, et par suite qu'ils sont chargés d'électricité positive. Il n'a pu observer de déviation dans un champ électrique. Cependant il indique pour le rayon de courbure de la trajectoire dans un champ magnétique la valeur RH = 390 000 et il estime que la vitesse $v = 2,5.10^9$ et le rapport $\frac{e}{m} = 6.10^3$.

D'après la constatation du sens de la déviation magnétique les rayons α seraient analogues aux Kanalstrahlen de M. Goldstein.

M. Rutherford a employé, comme on le voit, avec une

grande habileté une méthode électrique relativement grossière pour mettre en évidence un phénomène d'une grande délicatesse.

Cependant la disposition expérimentale soulève une objection sérieuse. Lorsque le rayonnement cathodique β est rejeté sur la paroi A, il y provoque des rayons secondaires intenses, qui, par l'ouverture supérieure, peuvent pénétrer dans la caisse de l'électroscope. Au contraire, lorsque le rayonnement β est rejeté sur B, le petit écran qui ferme à moitié l'ouverture de l'autre côté, arrête le rayonnement qui pourrait provenir de B. Donc, si les effets observés étaient dus à des effets secondaires ils se manifesteraient dans le sens observé par M. Rutherford, en sens contraire de la déviation des rayons β.

On pourrait donc douter des conclusions de M. Rutherford, si on ne les confirmait par d'autres expériences.

Je me suis proposé de mettre le phénomène en évidence par une expérience plus simple et plus sûre.

J'ai eu recours à l'une des dispositions photographiques déjà décrites et qui permettent une analyse des radiations parfois bien plus délicate que la méthode électrique.

L'expérience a été disposée comme il suit :

La matière active a été placée dans une rainure linéaire creusée dans un petit bloc de plomb. Au-dessus de cette source, à une distance a qui a varié entre 8 et 20 millimètres, on a disposé un écran formé de deux lames métalliques horizontales laissant entre elles une fente fine parallèle à la rainure. Au-dessus de la fente on disposait une plaque photographique non enveloppée. Quant la matière était du radium, on la couvrait avec une lame très mince

d'aluminium pour arrêter les rayons lumineux. Le tout était placé dans le champ magnétique d'un électro-aimant, la fente étant mise parallèlement au champ.

Si la plaque photographique est disposée horizontalement au-dessus de la fente, on observe sur celle-ci une impression d'autant plus diffuse et plus faible que la plaque est plus éloignée de la fente. La distance ne doit pas dépasser 1 ou 2 centimètres en raison de l'absorption par l'air et de la diffusion des rayons étudiés.

Si, pendant la pose, le champ magnétique intense est excité d'abord dans un sens, puis dans l'autre, on observe, en révélant l'épreuve, deux images du faisceau, ce qui montre que celui-ci a été dévié dans un sens puis dans l'autre.

Pour avoir le sens de la déviation on peut faire une autre épreuve comme il suit : on établit d'abord dans l'électro-aimant un champ très faible; les rayons cathodiques β traversent alors en partie la fente et on obtient une impression dans laquelle les rayons α sont très peu déviés et sont accompagnés d'un côté de la trace du spectre cathodique. Cette image peut être reçue sur une moitié seulement de la plaque photographique, l'autre moitié étant protégée par un écran métallique.

On déplace ensuite l'écran de manière à recouvrir la moitié qui vient d'être impressionnée et on établit un champ intense supérieur à 10 000 unités CGS, par exemple, et de même sens que le premier. Les rayons cathodiques β fortement déviés n'atteignent plus la plaque et l'impression obtenue se compose d'une bande qui s'écarte de la première trace des rayons α du côté opposé à celui où se trouve la trace du spectre cathodique.

L'existence de la déviation et le sens de la déviation sont conformes au résultat des expériences de M. Rutherford.

Si le champ est uniforme, si l'on connaît la distance b de la fente à la plaque, et si, par analogie avec ce que l'on sait des rayons β, on admet *a priori* que cette trajectoire est circulaire, la mesure de la déviation donne le rayon de courbure de la trajectoire des rayons déviés.

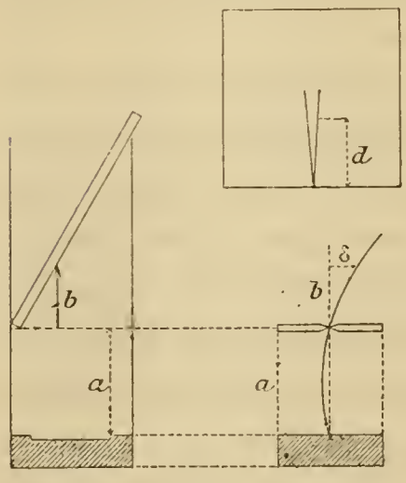


Fig. 21.

Dans les conditions de ces expériences, on obtient des résultats encore plus complets en disposant la plaque photographique non plus horizontalement, mais dans une position inclinée (fig. 21); la plaque coupe normalement le plan qui passe par la source et par la fente, et elle repose sur le plan horizontal qui contient la fente, l'arête de contact de la plaque photographique étant normale à la fente. Le faisceau, primitivement plan, se transforme, quand il est dévié par le champ magnétique, en un faisceau cylindrique dont la trace sur la plaque photographique inclinée serait un arc d'ellipse de grand rayon si la trajectoire était circulaire. En renversant le sens du courant dans l'électro-aimant on obtient une seconde trace qui, comme la première, part du point où la plaque est en contact avec la fente. Ces traces se présentent sous la forme de deux lignes divergentes qui peuvent être extrêmement fines et qui se prêtent à des constatations et à des mesures assez précises.

La figure 46 (Pl. VII) représente une épreuve agrandie de l'un des clichés obtenus, dans un champ de 20700 unités CGS.

Ces épreuves révèlent d'abord un phénomène important; les lignes fines ne montrent pas de dispersion appréciable, ou du moins elles ne manifestent pas une dispersion de l'ordre de grandeur de celle que subit le faisceau cathodique β dans un champ magnétique. Les traces paraissent aussi fines dans un champ supérieur à 20000 unités CGS que dans un champ notablement moindre. En se basant sur ce seul caractère on peut dire que le rayonnement α qui est efficace pour impressionner une plaque photographique se comporte comme un faisceau simple dont tous les rayons ont la même déviabilité magnétique.

Si l'on connaît exactement l'inclinaison φ de la plaque sur le plan horizontal, et la distance d d'un point de la plaque à l'arête inférieure, la distance de ce point à la fente est $b = d \sin \varphi$ et si l'on mesure en ce point l'écartement 2δ des deux traces, on a les éléments nécessaires pour calculer le rayon de la trajectoire supposée circulaire. On a en effet :

$$R^2 = \left[\frac{b(a+b)}{2\delta} + \frac{\delta}{2}\right]^2 + \frac{a^2}{4}.$$

Cette disposition expérimentale offre l'avantage de permettre de relever sur une même épreuve des déviations à diverses distances de la fente, et la comparaison de ces déviations a mis en évidence une propriété importante des rayons α.

Dans l'une des dispositions réalisées d'abord, avec un électro-aimant du système Weiss, on pouvait obtenir

des champs magnétiques très intenses, mais les champs n'étaient uniformes que dans le voisinage immédiat de l'axe. Les armatures tronc-coniques étaient terminées par des surfaces planes de 1 centimètre de diamètre et le champ allait en augmentant jusqu'à une très petite distance de l'axe. La source et la fente étaient disposées symétriquement au-dessus et au-dessous du champ, mais comme le champ diminue à mesure qu'on s'éloigne de la fente, les valeurs calculées de R devaient croître régulièrement.

Voici quelques valeurs relevées sur deux des épreuves.

PLAQUE B 23-1-03.		$a = 1^c,11$		H = 14 058.	
d	b	$a + b$	2δ	R	RH
c.	c.	c.	c.	c.	
0,10	0,0916	1,206	0,00624	16,974	238 658
0,122	0,1117	1,211	0,00786	17,376	244 233
0,150	0,1374	1,237	0,00941	18,224	256 211

PLAQUE B 13-2-03.		$a = 0^c,88$		H = 20 905.	
d	b	$a + b$	2δ	R	RH
c.	c.	c.	c.	c.	
0,036	0,0326	0,912	0,03100	9,294	192 938
0,050	0,0453	0,925	0,00412	10,184	212 906
0,100	0,0906	0,970	0,00696	12,654	264 536
0,150	0,1359	1,016	0,01091	12,674	264 958
0,200	0,1812	1,061	0,01515	12,708	265 655
0,250	0,2245	1,104	0,01961	12,792	267 469
0,300	0,2719	1,152	0,02426	12,895	269 579
0,350	0,3172	1,147	0,02852	13,325	278 565
0,400	0,3625	1,242	0,03305	13,638	285 104

La bobine dont l'arrachement servait à déterminer le

flux magnétique et par suite l'intensité du champ, avait un diamètre moyen de 10 millimètres et un diamètre extérieur de $11^{mm},8$. L'intensité calculée était donc inférieure à l'intensité dans le voisinage de l'axe, et supérieure à l'intensité des régions situées en dehors des parties planes.

Ces déterminations ayant montré la précision que l'on pouvait obtenir dans ces mesures, je me suis proposé de les reprendre dans un champ uniforme.

Les armatures coniques de l'électro-aimant ont été remplacées par des armatures planes cylindriques de 7 centimètres de diamètre, dont la distance a varié entre $9^{mm},35$ et $8^{mm},30$. On a vérifié que dans ces conditions, le champ magnétique entre les armatures était uniforme et que le déplacement de la bobine d'induction parallèlement à elle-même et normalement au champ n'induisait aucun courant appréciable dans le galvanomètre.

Le tableau suivant résume diverses mesures, soit sur des plaques disposées horizontalement parallèlement à la fente et donnant ainsi deux impressions linéaires parallèles (ces plaques sont désignées par la lettre *p*), soit sur des plaques obliques (désignées par la lettre *o*) et donnant des impressions concourantes.

DÉSIGNATION DES PLAQUES	*a*	*b*	*a* + *b*	H	R	R H
	c.	c.	c.		c.	
A-5-5-03 (*o*). .	1,12	0,4662	1,586	11 091	22,79	252,845
A-4-6-03 (*p*). . .	1,12	0,8350	1,955	11 091	25,48	282,600
A-9-6-03 (*o*) . .	2,04	0,2949	2,235	11 745	28,17	331,002
	2,04	0,3232	2,433	11 745	28,09	329,986
A-16-6-03 (*p*). .	2,04	0,8200	2,860	8 142	38,88	316,586
C-16-6-03 (*p*). .	2,04	0,8200	2,860	11 736	27,82	326,537

Les diverses séries ont été faites dans des conditions de précision à peu près semblables, de sorte que l'on ne peut attribuer les divergences à des erreurs d'expérience. Le tableau qui précède montre nettement que le produit RH est plus grand quand $(a + b)$ est plus grand.

Il résulte donc de ce tableau que le rayon de courbure de la trajectoire des rayons α augmente avec la distance entre la source et les points de la plaque photographique impressionnés par les rayons α.

Afin de contrôler ce résultat important, j'ai fait des mesures particulièrement soignées sur une plaque qui avait été disposée obliquement dans un champ uniforme. Dans ces expériences la grandeur du champ est limitée par l'échauffement qui résulterait du passage prolongé dans le fil de l'électro-aimant d'un courant trop intense, et la pose ne peut être maintenue pendant plus d'une heure et demie avec des courants dépassant 5 ampères. La disposition oblique a permis de relever sur la même épreuve un

PLAQUE A-18-6-03 (o)

H = 9955 | $a = 2^c,04$ | $b = d \times 0,983$ | 1 tour de vis = $0^{mm},30988$

d	b	$a + b$	2δ mesuré en tours de vis. Observé.	2δ mesuré en tours de vis. Courbe.	2δ en centimètres.	R	RH
mm.	c.				c.	c.	
1	0,0983	2,138	0,240	0,232	0,00719	29,25	291 228
2	0,1966	2,236	0,484	0,484	0,01489	29,55	294 228
3	0,2949	2,335	0,760	0,740	0,02293	30,05	299 173
4	0,3932	2,433	1,060	1,020	0,03160	30,29	301 583
5	0,4915	2,521	1,240	1,300	0,04028	30,77	306 402
6	0,5898	2,630	1,660	1,605	0,04973	31,21	310 767
7	0,6881	2,728	1,900	1,910	0,05928	31,69	315 530
9	0,8847	2,925	2,545	2,545	0,07864	32,84	326 998
11	1,0813	3,121	3,180	3,180	0,09854	34,29	341 372

grand nombre de déviations correspondant à des impressions simultanées, dans le même champ magnétique, et à des distances différentes de la source.

Le tableau ci-contre met nettement en évidence l'accroissement du rayon de courbure de la trajectoire à mesure que le parcours dans l'air est plus grand. Le nombre 390 000 trouvé par M. Rutherford correspond à un trajet dans l'air de plus de 5 centimètres, et concorde avec les résultats précédents.

Il semble que l'on doive attribuer cette variation dans le rayon de courbure de la trajectoire à une action produite entre l'air et les radiations qui le traversent. Si l'air est la cause de cette perturbation, on doit l'éviter en opérant dans le vide. L'expérience est difficile à réaliser; cependant tout récemment M. Des Coudres (1) est parvenu à mesurer dans le vide les déviations magnétiques et électriques des rayons α. La distance de la source à la plaque photographique était de 8 c. Dans ces conditions, et pour un champ magnétique de 2000 unités, M. Des Coudres a trouvé :

$$RH = 256.000.$$

La déviation électrique a été obtenue dans un champ électrique de 3.10^{12} unités électromagnétiques CGS, et a conduit aux valeurs

$$\frac{e}{m} = 6,4.10^3 \quad \text{et} \quad v = 1,65.10^9.$$

La valeur trouvée pour le produit RH est la même que celle que l'on obtient dans l'air pour des distances six à

(1) *Physikalische Zeitschrift*, n° 17, 1903, p. 483.

huit fois moindres, et la comparaison de ce dernier nombre avec ceux des tableaux précédents fait ressortir l'influence de l'air sur la trajectoire des rayons α.

Pour établir la nature de cette influence, il est nécessaire de mesurer la déviation par un champ électrique dans l'air, et de calculer pour différents points d'une même trajectoire, les valeurs de $\frac{m}{e}$ et de v, dont le produit donne la valeur de RH. On verrait alors de quelle manière ces facteurs varient le long de la trajectoire.

Si les valeurs données par M. Rutherford résultaient de mesures précises, on devrait, en les comparant aux résultats de M. Des Coudres, en conclure que la vitesse va en augmentant le long de la trajectoire et que $\frac{e}{m}$ est constant. Mais, d'une part, M. Rutherford n'a donné le nombre $v = 2{,}5.10^9$ que comme une évaluation sans précision, et, d'autre part, il est difficile d'admettre *a priori* que la vitesse aille en augmentant sans que les autres grandeurs m et e subissent des variations.

On peut, au contraire, envisager les hypothèses, soit d'une augmentation de la masse m, soit d'une diminution de la charge e.

On a entre les variations de RH, m et e la relation

$$\frac{d(\mathrm{RH})}{\mathrm{RH}} = \frac{dm}{m} + \frac{dv}{v} - \frac{de}{e}.$$

Supposons d'abord que m soit une masse matérielle : celle-ci pourrait augmenter progressivement en recueillant sur son passage les ions de l'air, en faisant la « boule de

neige ». Or on ne conçoit pas une augmentation de masse sans une diminution de la vitesse. La force vive peut rester constante ou diminuer. Supposons qu'elle reste constante, on a :

$$\frac{dm}{m} + \frac{2\,dv}{v} = 0$$

et si la charge reste constante, la variation de RH aura le signe de la variation de m.

L'augmentation de RH peut s'expliquer par une augmentation dans la masse; celle-ci augmentant relativement plus vite que la vitesse ne diminue. Si la force vive diminuait, le produit RH n'augmenterait pas nécessairement quand m augmente.

Nous venons de supposer que m s'accroît en attirant les ions de l'air; cette hypothèse n'est pas en contradiction avec la valeur du rapport $\frac{m}{e}$ qui paraît être de l'ordre de grandeur du rapport de la masse des ions électrolytiques aux charges qu'ils transportent.

La masse m, dans les rayons α, est chargée positivement; elle devrait donc attirer les ions négatifs de l'air, et par suite sa charge e diminuerait. On voit que dans cette hypothèse une partie au moins de l'effet qui produit une augmentation du rayon de courbure de la trajectoire serait imputable à une diminution de la charge e.

On a vu plus haut que les expériences de M. Kaufmann tendraient à établir que la masse m est une grandeur purement électromagnétique, fonction de v et de e. S'il en était réellement ainsi, on pourrait, sans faire intervenir des masses matérielles, supposer que la charge e attire les

électrons négatifs de l'air, et qu'elle diminue le long de la trajectoire. On exprime le même fait, en disant que la charge e se dissipe progressivement dans l'air rendu conducteur sur son propre passage.

On verra plus loin qu'il est possible que les rayons cathodiques présentent cette propriété à un faible degré. Peut-être la grandeur relative de l'effet observé avec les rayons α est-elle corrélative de la vitesse moindre de ces rayons, et de la mobilité des ions négatifs, plus grande que celle des ions positifs.

Ces spéculations montrent l'intérêt qui s'attache à l'étude de ces radiations, et font désirer des recherches plus complètes sur la propriété qui vient d'être mise en évidence.

Rayons α du polonium. — Il était très important de vérifier si les rayons du polonium présentaient le phénomène de déviabilité magnétique. Bien que les caractères révélés par mes anciennes expériences et par celles de M. et Mme Curie aient conduit à assimiler ce rayonnement aux rayons α du radium, il était nécessaire de déterminer directement sa nature en le soumettant au contrôle de la déviabilité magnétique.

Malheureusement, au moment de faire cette expérience, les échantillons de polonium très actif ont manqué. Les préparations de polonium qui avaient servi aux expériences de 1900 sont aujourd'hui très affaiblies. M. et Mme Curie ont eu l'obligeance de me prêter pour les expériences présentes quelques grains d'une préparation de polonium métallique qui, après avoir possédé une activité comparable à celle du radium, est aujourd'hui notablement plus faible tout en ayant une activité supérieure à celle des produits qui viennent d'être mentionnés.

La faiblesse du rayonnement a rendu les expériences très difficiles par la nécessité où l'on s'est trouvé, pour obtenir des épreuves d'une intensité suffisante, de prolonger considérablement le temps de pose.

Avec le radium il faut exposer la plaque photographique pendant 40 ou 50 minutes au rayonnement dévié dans chaque sens pour avoir de très bonnes épreuves, analogues à celle dont on a donné un agrandissement. Avec le rayonnement du polonium il faut prolonger la pose pendant 10 heures au moins pour chaque sens de l'aimantation.

Dans ces conditions l'électro-aimant s'échaufferait trop avec des courants atteignant 8 ampères comme dans les expériences faites avec le radium. Il a fallu réduire le courant à 5 ampères et ne le laisser passer que pendant 5 heures de suite. Après plusieurs essais préliminaires, on a réparti la pose totale de 20 heures en 4 jours consécutifs, par fractions de 5 heures. Dans les intervalles on couvrait la matière active avec un écran arrêtant le rayonnement; on interrompait le courant et l'électro-aimant se refroidissait jusqu'au lendemain.

En réalisant une disposition identique à celle qui avait été employée pour le radium, on obtint des épreuves faibles, mais dans lesquelles la divergence des deux traces des rayons déviés était bien nette, et pouvait se prêter à des mesures.

Immédiatement après avoir obtenu l'une de ces épreuves on en fit une nouvelle avec le même dispositif et dans des conditions identiques, en substituant au polonium un sel de radium recouvert d'une feuille très mince d'aluminium, mais en posant seulement 50 minutes pour chaque sens de la déviation.

Les deux épreuves obtenues dans ces conditions identiques, l'une avec le polonium, l'autre avec le radium, sont superposables. Les déviations mesurées ont paru identiques lorsqu'elles ont été comparées dans des régions où les mesures étaient les plus nettes. Dans d'autres régions les petites différences observées peuvent être attribuées à des erreurs de pointés dues à la faiblesse des images ou aux inégalités d'intensité de l'impression provoquées par une répartition irrégulière de la matière active dans la cuve linéaire qui la contenait.

Pour vérifier avec le polonium le sens de la déviation, on a fait une nouvelle épreuve semblable aux précédentes, mais quand on a renversé le sens du courant dans l'électro-aimant, on a déplacé légèrement la plaque parallèlement à elle-même après avoir repéré le sens du déplacement et le sens dans lequel serait dévié le faisceau cathodique du radium. Le sens de la déviation des rayons du polonium a été reconnu être le même que celui de la déviation des rayons α du radium et inverse de celui de la déviation du faisceau cathodique.

Les rayons du polonium ne manifestent pas non plus une dispersion appréciable.

Il résulte donc de ces déterminations que le rayonnement du polonium est identique au rayonnement α du radium, et assimilable à un flux de particules chargées positivement et animées de vitesses qu'on ne peut déterminer par cette seule expérience.

Pour les déterminer il serait nécessaire de mesurer la déviation du faisceau dans un champ électrique.

CHAPITRE VI

§ 1. — *Transmission du rayonnement au travers des corps. Rayonnement secondaire.*

Au début de mes recherches sur le rayonnement de l'uranium, j'avais observé que tout corps frappé par ce rayonnement émettait d'autres rayons qui furent pris d'abord pour une diffusion des rayons incidents, et que je reconnus plus tard constituer un rayonnement secondaire. Quelques faits relatifs à ce phénomène ont été rapportés p. 37. Le rayonnement du radium a montré dans la suite des effets analogues, en particulier les effets qui sont résumés p. 113, et, enfin, on a vu que chaque fois qu'une substance active était posée sur une plaque photographique et recouverte d'une cloche en verre ou en métal, un rayonnement secondaire intense était produit sur la face intérieure de cette cloche, et venait impressionner la plaque autour de la source. De nombreuses photographies faites avec l'uranium ou le radium (voir notamment les fig. 12, 14, 15, 26, 27, 35 des planches) donnent des exemples de ce phénomène. J'ai mentionné plus haut que ce rayonnement semblait analogue, sinon identique, en raison de son ori-

gine, à celui qui avait été découvert par M. Sagnac sous l'influence des rayons X.

Le rayonnement secondaire se montre plus absorbable que celui qui lui donne naissance. D'autre part, le rayonnement excitateur se compose de rayons de diverses natures, inégalement pénétrants, qui doivent produire des effets secondaires différents. Il était nécessaire d'analyser le faisceau incident, et l'on a vu que l'influence d'un champ magnétique permettait d'atteindre ce but.

Je me suis donc proposé de disperser par un champ magnétique un faisceau de rayons intenses, ceux du radium, qui contiennent les trois espèces de rayons, puis de suivre à l'intérieur de divers corps transparents les trajectoires des divers rayons, et de reconnaître les phénomènes secondaires qui accompagnent leur transmission.

La méthode générale employée dans ce but a été la suivante (1) :

On dispose la matière active de façon à obtenir un faisceau vertical très mince issu d'une source linéaire ayant une longueur de quelques millimètres. On obtient ce résultat en plaçant la matière dans une rainure étroite et profonde creusée dans un petit bloc de plomb.

On place ce système dans un champ magnétique aussi uniforme que possible et, comme la pose doit être longue, on s'est servi de champs produits par des aimants. La source linéaire est placée horizontalement, parallèlement au champ. Si celle-ci est du radium, on la couvre d'une

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, t. CXXXII, p. 736 (25 mars 1901), et p. 1286 (3 juin 1901).

lame mince d'aluminium pour éviter la lumière émise. On dispose alors au-dessus de la source une plaque verticale, perpendiculaire au champ, et coupant le faisceau dévié, dont les divers rayons atteignent la plaque sous une incidence presque rasante.

Si, dans le faisceau dévié, on considère un faisceau de rayons qui possèdent la même vitesse, ceux de ces rayons qui sont émis normalement au champ constituent des surfaces cylindriques de rayon R. Aucun d'eux n'impressionne la plaque; les rayons voisins émis presque normalement sous l'angle α voisin de 90° décrivent des surfaces cylindriques de rayon R sin α, très voisines du cylindre R, et vont atteindre la plaque photographique; et, si les limites de la variation de l'angle α aux environs de 90° sont très petites, tout se passera comme si la plaque coupait des cylindres de rayons R. Tout rayon qui atteint la plaque fait une impression en ce point et s'y arrête, ou la traverse. Un rayon infiniment voisin, et pour lequel α est un peu différent, viendra faire sa trace au delà, sur un point qui différera peu de la trajectoire réelle du rayon rasant. On aura donc sur la plaque non pas la trajectoire réelle d'un rayon issu normalement au champ, mais une pseudo-trajectoire qui en différera très peu.

Sur la plaque photographique, on dispose, en contact avec celle-ci, divers écrans percés de petites fentes normales à la plaque. Ces petites fentes limitent des radiations déterminées. Par les premières fentes que rencontre le rayonnement, passent des portions de spectres purs, et, si, sur le trajet de ceux-ci, on dispose une seconde fente, on isole un faisceau circulaire dont le rayon est déterminé

par les pieds des deux fentes et l'intersection du plan de la plaque avec la source linéaire. Les deux fentes et la source constituent trois génératrices parallèles qui définissent un cylindre à base circulaire, et toutes les trajectoires passant par les deux fentes s'enroulent sur le cylindre, et viennent atteindre la plaque sur le contour de la circonférence de base (fig. 22). L'impression est donc bien une circonférence dont le rayon R′ est, pour chaque trajectoire, égal à R sin α. Le rayon de courbure des trajectoires qui aboutissent aux divers points de la trace circulaire n'est donc pas le même. Chacune de ces trajectoires est définie par une valeur de l'angle α et par $R = \frac{R'}{\sin \alpha}$. Le rayon de courbure est un peu supérieur à R′ et va en augmentant quand α diminue, c'est-à-dire à mesure que l'impression se rapproche de la source linéaire (fig. 23). Lorsque celle-ci est courte, les variations de sin α sont très petites, et l'on a pratiquement R′ = R. La trace est produite par un faisceau de radiations qui décrivent des trajectoires dont les rayons de courbure varient dans des limites très petites.

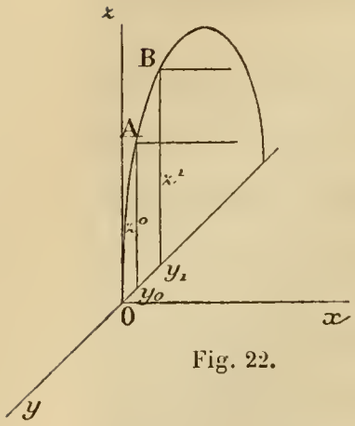


Fig. 22.

Fig. 23.

Enfin, si, ayant isolé ainsi un rayon simple, on dispose au delà des deux fentes une matière transparente, les rayons qui aboutissent aux divers points de la pseudo-trajectoire auront parcouru dans la matière des chemins sensiblement égaux à ceux qui correspondent à la trajec-

toire réelle du rayon normal au champ au travers de cette matière. En réalité, l'épaisseur traversée est un peu plus grande. Si α est l'inclinaison du rayon sur le champ, et s l'arc de la projection, l'arc réellement parcouru est $\frac{s}{\sin \alpha}$. Le rayon de courbure correspondant est aussi $\frac{R'}{\sin \alpha}$. La radiation correspondante est donc un peu plus pénétrante, ce qui constitue une sorte de compensation.

Tout se passe comme si l'on suivait la trajectoire à l'intérieur même du corps transparent. Pratiquement, les écrans munis de fentes et les matières transparentes étaient collés sur une lame de verre, normalement à celle-ci, et amenés à des dimensions convenables pour être pressés contre la plaque photographique pendant la pose. La figure 50, Pl. VII, rend compte de cette disposition, on y voit les écrans et la petite cuve, mais l'aimant et la plaque photographique ont été enlevés.

La figure 61, Pl. X, donne un exemple des courbes qu'on peut obtenir. L'intérieur de l'espace compris entre les écrans est très fortement impressionné par des rayons secondaires. Puis on voit, après la première série d'ouvertures, des spectres purs, et après la seconde des rayons simples. Les combinaisons d'ouvertures deux à deux donnent parfois naissance à plusieurs rayons simples différents sortant par la même ouverture.

Si la source est enfermée dans un petit tube en verre, les rayons secondaires du verre viennent s'ajouter aux radiations qui le traversent, mais les rayons α sont éliminés.

Si le sel de radium est placé directement dans la rai-

nure et recouvert d'une lame d'aluminium très mince, les rayons α peuvent pénétrer dans la première région et contribuer à augmenter l'impression.

Dans l'épreuve dont il vient d'être question, on voit encore que la partie la plus efficace du rayonnement déviable a donné une impression *renversée* dans le voisinage de la source et qu'elle part presque tangentiellement à la verticale. Enfin, on reconnaît la trace rectiligne des rayons non déviables très pénétrants que nous pouvons appeler les rayons γ.

Les courbes qui figurent les trajectoires ne sont nettes que dans le voisinage des écrans qui les ont limitées. Il semble que les rayons se diffusent et s'affaiblissent considérablement à une petite distance des écrans.

Ce fait paraît dû à ce que, près des ouvertures qui ont une certaine hauteur, les points reçoivent des rayonnements un peu différents entre eux mais venant de tous les points de la source, tandis qu'à partir d'une certaine limite, la partie efficace de la source va en diminuant de plus en plus, et l'obliquité augmente très vite.

Mesures relatives aux rayons du radium. — J'ai réalisé, par cette méthode un très grand nombre d'épreuves photographiques qui toutes ont donné, soit des résultats importants, soit des indications intéressantes. On en a cité seulement quelques-unes afin de ne pas multiplier outre mesure le nombre des figures.

Dans la disposition qui a donné l'épreuve reproduite fig. 53, Pl. VIII, on a placé, au delà d'une série d'ouvertures par lesquelles passent des fragments de spectre, une lame

d'aluminium de $0^{mm},1$ d'épaisseur. L'épreuve obtenue est très instructive : elle montre d'abord, par les ouvertures où passent des rayons γ non déviables, qu'il y a discontinuité entre ces rayons et les rayons déviables β. La trace de la lame d'aluminium est figurée par un trait blanc dans une région et noir dans l'autre. Les rayons les moins déviés traversent la lame d'aluminium sans altération et sans qu'aucun phénomène secondaire puisse faire soupçonner sa présence. A mesure que les rayons sont de plus en plus déviables, ils produisent un renforcement d'action de plus en plus intense à la sortie de la lame. Celle-ci se détache en clair, surtout dans la région la plus déviée de chaque spectre partiel; les rayons qui traversent la lame sont affaiblis et provoquent à leur sortie un rayonnement secondaire intense qui s'ajoute à leur action sur la plaque photographique.

Par exemple, à partir du 2e et surtout du 3e spectre à gauche, l'impression produite par le rayonnement à la sortie de l'aluminium est plus intense que celle qui est produite par le rayonnement incident. A partir du 5e spectre, on voit apparaître au contact même de la face de sortie une impression encore plus intense, qui s'étend à peine au delà du contour extérieur de l'écran d'aluminium. Pour le spectre suivant, une partie seulement des rayons provoque un rayonnement secondaire sur la face de sortie. A partir de cette limite, la trace de la lame cesse de se projeter en clair; les rayons qui atteignent la plaque photographique sur la tranche de la lame de l'aluminium en contact avec la plaque provoquent des rayons secondaires, absorbés sur place et qui marquent en noir la section de la lame

d'aluminium. Pour le 8e spectre, on retrouve sur le bord le moins dévié une tendance à la production de rayons secondaires à l'extérieur, puis tous les autres rayons plus déviables provoquent sur la face d'incidence des rayons secondaires intenses qui produisent une impression au milieu de laquelle les rayons incidents semblent disparaître. Enfin, par les ouvertures de droite, on voit sortir des faisceaux très faibles qui semblent produits par les rayons secondaires du plomb, et qui paraissent entraînés dans le même sens par le champ magnétique.

Cette épreuve se prête même à des déterminations numériques. Le champ uniforme de l'aimant avec lequel a été faite l'expérience était de 859 unités CGS.

Entre les rayons non déviables γ et les rayons β les moins déviables, il y a une discontinuité. La trajectoire des radiations les moins déviables a un rayon de courbure d'environ $11^c,6$ ce qui donne pour caractériser ces rayons le produit

$$RH = 9970.$$

Les rayons de courbure des radiations limites, qui donnent à leur sortie de l'aluminium une impression intense, sont : pour les moins déviables (5e faisceau)

$$R = 4^c, \qquad RH = 3436,$$

et pour les plus déviables

$$R = 1^c,75, \qquad RH = 1500.$$

On voit combien sont précieuses les indications données par cette seule épreuve. Celle-ci montre en particulier

qu'il y a des rayons déviables, actifs sur la plaque photographique, qui traversent l'aluminium sans altération; elle donne, en outre, l'explication des maxima d'impression que l'on observe sous les écrans placés sur les plaques photographiques dans les expériences rapportées plus haut (p. 156), ainsi que les valeurs numériques qui définissent les radiations limites qui produisent ces impressions (1).

On a mesuré sur d'autres épreuves les rayons de courbure des trajectoires limites des radiations les moins déviées du rayonnement β du radium.

Voici, par exemple, les résultats relevés sur deux épeuves faites en plaçant le même dispositif d'écrans dans deux champs magnétiques différents.

Ces écrans avaient des dimensions un peu différentes de celles des écrans qui ont donné l'épreuve ci-dessus.

---

(1) Les valeurs 3 400 et 1 500 trouvées pour les rayons qui limitent l'impression au travers de l'aluminium sous l'épaisseur de $0^{mm},1$ sont plus grandes que celles qui ont été obtenues avec des champs magnétiques plus intenses et avec un autre dispositif dans le chapitre précédent (p. 160). Les nombres étaient 2 300 pour une des limites, et variaient entre 1 400 et 1 200 pour l'autre. Cette différence ne paraît pas devoir tenir au second dispositif qui ne peut donner pour R que des nombres un peu inférieurs aux rayons de courbure véritables.

Si l'on observe que dans les faibles champs magnétiques les longueurs des trajectoires étudiées avaient environ 5^c, tandis que dans les premières expériences avec des champs plus intenses les longueurs des trajectoires variaient seulement entre $1^c,5$ et 3^c, on est conduit à penser que l'augmentation du rayon de courbure est peut-être un effet lié à la longueur du trajet dans l'air comme cela a été observé pour les rayons α; mais les mesures actuelles ne sont pas assez précises pour décider cette question, et je n'ai pu encore entreprendre des expériences décisives.

On a ainsi obtenu :

DÉSIGNATION DES PLAQUES.	H	R	RH
		c.	
A-29-4-03 . .	859	11,6	9970
A-19-3-03 . .	523	18,3	9570
	523	19,8	10380

Pour le champ de 859, le rayon de courbure a été trouvé le même que dans l'épreuve étudiée plus haut. La moyenne des deux dernières valeurs de RH est égale à la première. Les mesures ne sauraient avoir une plus grande précision, étant données les dimensions des ouvertures et de la source. On peut cependant admettre sans grande erreur que les rayons β les moins déviables sont caractérisés par une valeur du produit RH voisine de 10^4.

On peut étudier ces phénomènes avec plus de détail en isolant des radiations simples dans les spectres partiels considérés plus haut. Tel est le but de la disposition de la figure 54, Pl. VIII. L'épreuve correspond au même champ magnétique H = 859 que ci-dessus. Un premier écran percé de quatre ouvertures isole quatre faisceaux qui rencontrent une série d'ouvertures pratiquées sur un second écran. Une lame d'aluminium de $0^{mm},1$ d'épaisseur, concentrique au dernier écran, reçoit les trajectoires des rayons simples isolés par les deux séries d'ouvertures. On retrouve avec ces rayons les mêmes faits qui viennent d'être décrits. En particulier un rayon bien déterminé

$$R = 8^c,8, \qquad H = 859, \qquad RH = 7560,$$

traverse l'aluminium sans altération dans sa courbure et sans laisser de trace secondaire sur son passage.

Un autre rayon

$$R = 5^c, \qquad H = 859, \qquad RH = 4295,$$

produit à sa sortie de l'aluminium un rayonnement secondaire intense qui suit la même trajectoire que le rayon incident; les autres phénomènes sont conformes à ceux qui ont été déjà indiqués.

La figure 55, Pl. VIII (A-21-5-01), contient également des renseignements intéressants. On y voit, en particulier, passer par la même ouverture deux radiations dont les trajectoires sont différentes, et dont l'une traverse l'aluminium, tandis que l'autre provoque à sa sortie des rayons secondaires.

Dans les épreuves précédentes, le rayonnement traverse la lame d'aluminium presque normalement. Il importait de voir comment les rayons inégalement déviables traversaient des lames obliques. La figure 59, Pl. IX (A-12-3-02), correspond à un dispositif dans lequel, en face des ouvertures, on avait placé une série de lames d'aluminium obliques dont l'ensemble figurait les aubes d'une roue de moulin. Les rayons simples rencontraient ces lames d'aluminium, de $0^{mm},1$ d'épaisseur, sous des angles variant entre 45° et 70° environ. Même pour ces directions très obliques, les rayons les moins déviables ont traversé les lames comme si celles-ci n'existaient pas. La présence de ces lames est accusée par de faibles rayons secondaires provoqués sur celles-ci, soit par un rayonnement ayant traversé les écrans en plomb, soit par des rayons secon-

daires émis par les ouvertures de ces écrans. Il en est ainsi pour les quatre premiers faisceaux isolés. Le cinquième a produit un rayonnement secondaire intense à sa sortie, et ce rayonnement semble émis, en partie du moins, normalement à la lame oblique.

Des dispositions analogues ont permis de suivre les diverses trajectoires à l'intérieur d'un corps transparent, tel que la paraffine. Dans ce but on a disposé, sur le trajet des rayons simples isolés, une bande de paraffine dont l'épaisseur a varié de 2 millimètres à 8 millimètres.

L'épreuve fig. 57, Pl. IX (A -15-1-03), relative à l'épaisseur de 2 millimètres, montre que les rayons les moins déviés traversent cette épaisseur, que leur trajectoire conserve la même courbure, et qu'ils provoquent à leur point de rencontre avec la plaque une impression intense. Au sortir de la paraffine, ils sont très affaiblis et entraînent un rayonnement secondaire faible. Les autres rayons pénètrent d'autant moins profondément dans la paraffine qu'ils sont plus déviables. Les rayons les plus déviables s'arrêtent à la surface de la paraffine et leur trace apparaît seulement dans l'intérieur des fentes de l'écran où le rayonnement secondaire du plomb peut s'ajouter à leur action.

Les mêmes faits se répètent avec une épaisseur de paraffine de 8 millimètres (fig. 58, Pl. IX). Les rayons les moins déviables ne traversent plus cette couche ; ils s'arrêtent à une profondeur de 2 millimètres environ en provoquant un rayonnement secondaire qui se diffuse en se propageant en avant du rayon incident. Les autres rayons, plus déviables, s'enfoncent à des profondeurs d'autant moindres qu'ils sont plus déviables et paraissent s'arrêter

brusquement dans la paraffine. Le point d'arrêt est marqué par un maximum d'impression attribuable à des rayons secondaires absorbés sur place et ne se propageant pas au delà. Enfin, les rayons les plus déviables s'arrêtent à la surface de la paraffine.

On peut répéter une expérience analogue avec le verre.

En entourant la première série d'ouvertures avec un tube de verre mince, on constate que les rayons les moins déviables les traversent, puis, dans la région de déviabilité moyenne, ainsi que dans celle des rayons les plus déviables, on observe, à la surface extérieure, que des rayons secondaires très absorbables ont remplacé les rayons incidents.

Lorsque le verre est très près de la source, l'intensité de ces rayons secondaires, qui se substituent au rayonnement absorbé, est telle qu'il ne paraît plus y avoir d'absorption, ceux-ci ayant remplacé les rayons incidents. Ce fait explique les phénomènes observés plus haut (p. 161) sur l'absence apparente d'absorption par les écrans lorsque ceux-ci sont très voisins de la source.

Les diverses épreuves mentionnées plus haut mettent encore en évidence des rayons très pénétrants et non déviables qui donnent des traces rectilignes parfois très fines et très nettes. Si sur le trajet de ces rayons extrêmement pénétrants on dispose un prisme de quartz de 60°, on constate que le faisceau traverse ce prisme sans déviation ni diffusion et sans absorption appréciable. Dans l'épreuve reproduite fig. 60, Pl. IX (A-14-2-03), on n'a pas intercepté la lumière émise par le radium, de sorte que l'on peut voir à la fois la trace des rayons lumineux déviés par le prisme et

celle des rayons non déviés. Ces rayons, qu'on peut appeler rayons γ, se comportent comme le feraient des rayons X.

Mesures relatives aux rayons de l'uranium. — On a vu plus haut (p. 140, ch. V) que l'impression produite par le rayonnement de l'uranium dans un champ magnétique ne comprenait qu'une partie déviable, dans le même sens que les rayons cathodiques. L'intensité du rayonnement est trop faible pour que l'on puisse en conclure qu'il n'existe pas dans ce rayonnement des rayons de la nature des rayons γ du radium. Mais il n'en est pas de même pour les rayons α. Ceux-ci, dans les rayonnements du radium et du polonium, sont photographiquement plus actifs que la partie cathodique du rayonnement du radium, et, à moins d'une interversion considérable dans les intensités relatives des deux espèces de rayons, les rayons α devraient produire une impression en même temps que les rayons β.

Comme on pouvait craindre une absorption par l'air de rayons très absorbables, et comme d'autre part j'avais reconnu l'existence d'une partie du rayonnement de l'uranium très active pour ioniser l'air et considérablement absorbée par une épaisseur d'air de 1 centimètre, je me suis proposé de répéter dans le vide l'expérience rapportée au chapitre V. La disposition était tout à fait analogue à celle qui a été utilisée pour l'étude de la déviabilité des rayons α du radium et du polonium (fig. 21, p. 190) et pouvait se prêter à des mesures. La distance de la source lumineuse à la fente était de $2^{mm},45$. L'ensemble du dispositif dont la section était contenue dans un rectangle de 11 millimètres de hauteur sur 8 millimètres de largeur, fut enfermé dans un étui en carton opaque, puis

le tout fut mis dans un tube de verre horizontal, à côté d'un peu d'acide phosphorique pour enlever la vapeur d'eau. On fit le vide presque parfait dans le tube qui fut ensuite scellé à la lampe et placé dans le champ magnétique d'un aimant. L'intensité mesurée entre les armatures fut trouvée égale à 937,4 unités CGS. Au bout de quarante-trois jours, on ouvrit le tube, on en retira l'étui, et on développa la plaque. L'épreuve est reproduite figure 44 *bis*, Pl. VII. Elle est identique à l'épreuve obtenue dans l'air à la pression atmosphérique. Il ne semble donc pas y avoir, dans le rayonnement de l'uranium, de rayons très absorbables de la nature des rayons α et du radium et du polonium.

L'épreuve obtenue fournit, en outre, un moyen de mesurer la déviabilité des rayons de l'uranium.

Les résultats des mesures faites dans les régions limites et dans la région du maximum d'impression ont été les suivants :

$a = 2^{mm},45$.	$b = 2^{mm},223$.	$d = 3^{mm}$.
δ	R	RH
$0^c,0394$	$1^c,342$	1258
$0^c,0275$	$1^c,910$	1791
$0^c,0160$	$3^c,257$	3053
$0^c,0105$	$4^c,833$	4531

La région du maximum d'impression correspond à RH = 1791.

On voit que les rayons de courbure des trajectoires sont

du même ordre de grandeur que ceux du faisceau cathodique du radium.

En comparant deux épreuves faites dans des conditions identiques, l'une avec le radium, et l'autre avec l'uranium, on reconnaît que l'impression produite par l'uranium se superpose à la partie la moins déviable du faisceau cathodique du radium.

Cette constatation donne l'explication de la pénétrabilité relative considérable du faisceau des radiations émises par l'uranium.

Déviabilité des rayons secondaires produits par le rayonnement β. — Dans toutes les épreuves obtenues par la méthode indiquée plus haut, on observe, à l'intérieur des écrans, des impressions intenses. Celles-ci sont produites, soit par des rayons déviés émis obliquement par la source, soit par des phénomènes secondaires.

Dans la plupart de ces épreuves les rayons α étaient arrêtés au sortir de la cuve de radium par des écrans de verre ou d'aluminium, et n'intervenaient pas.

Les épreuves reproduites fig. 51 et 52, Pl. VII (A. et B. 27-4-01), mettent bien en évidence la cause principale de ces impressions. Dans ces épreuves l'écran crénelé n'existe que d'un côté de la verticale; pour la première, le rayonnement déviable est rejeté sur l'écran; pour la seconde, il est rejeté en dehors. Dans les deux cas, on voit du côté opposé à celui de la déviation un large faisceau dévié provenant de radiations émises obliquement. Ce faisceau paraît contenir, outre les radiations émises par la source, des radiations secondaires intenses émises par les parois métalliques qui limitent le rayonnement au départ.

En rencontrant les écrans le rayonnement dévié provoque des effets secondaires qui se superposent aux rayons incidents et donnent lieu aux apparences observées.

Les rayons, directs ou secondaires, peuvent sortir par des ouvertures latérales opposées à celles par lesquelles sortent les rayons simples étudiés plus haut. Lorsque ce sont des rayons directs, ils sortent suivant des courbes déviées dans le même sens que les autres faisceaux cathodiques dont ils forment une partie.

Les rayons secondaires donnent naissance au travers des ouvertures à des faisceaux faibles très divergents, limités aux lignes tangentes intérieurement aux bords des ouvertures et qui déterminent l'angle sous lequel est vue la surface intérieure (fig. 24). A ces rayons qui viennent de l'intérieur s'ajoutent ceux qui sont émis par les parois des bords des fentes pratiquées dans les écrans, surtout par les parois qui reçoivent directement une partie du faisceau dévié venant de la source active. Dans ce cas l'impression résultant du phénomène secondaire semble produite par un rayonnement plus dévié que le rayonnement incident, mais ce n'est là qu'une apparence.

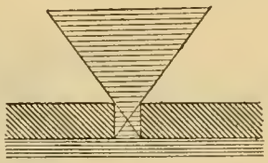


Fig. 24.

Ces divers phénomènes se voient dans l'épreuve citée précédemment (fig. 55, Pl. VIII, A-21-3-01) ainsi que dans l'épreuve A-18-5-01, fig. 56, Pl. VIII. Cette figure montre en particulier des faisceaux diffus sortant par des ouvertures que le rayonnement direct ne paraît pas atteindre, et provoquant des rayons secondaires sur une lame d'aluminium de $0^{mm},1$ d'épaisseur.

On peut encore citer une épreuve fig. 62, Pl. X (A-19-5-01), dans laquelle un espace ménagé latéralement du côté opposé à celui de la déviation est protégé contre le rayonnement direct. Cet espace est fortement impressionné par des rayons secondaires qui peuvent même sortir par des ouvertures pratiquées à cet effet.

Dans aucune de ces épreuves on n'a pu démontrer nettement si les rayons secondaires étaient déviables par le champ magnétique. La disposition suivante permet de constater leur déviabilité. La figure ci-contre (fig. 25) donne la disposition des écrans et l'épreuve obtenue est reproduite fig. 67, Pl. XI.

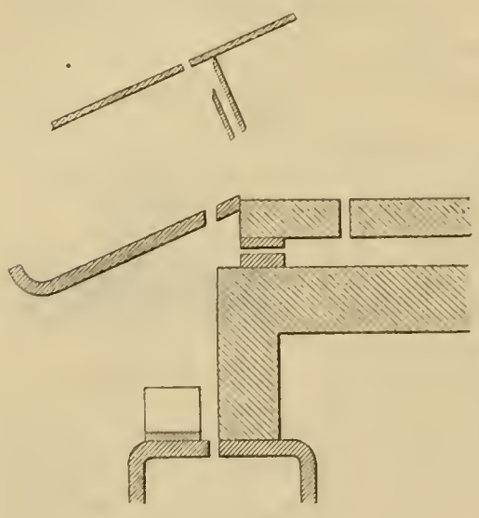


Fig. 25.

Le faisceau cathodique dévié (dont l'impression apparaît renversée dans l'épreuve par suite de la longue pose) tombe sur une lame de plomb inclinée. En face de cette lame et du côté opposé à la déviation se trouve un canal horizontal étroit limité par deux barres épaisses d'étain; ce canal débouche dans un espace plus large protégé également par d'épaisses barres d'étain contre le rayonnement direct de la source.

L'épreuve montre que le rayonnement secondaire issu de la lame de plomb s'est engagé dans ce canal, puis que, en débouchant dans l'espace plus large, il a été dévié dans le sens de la déviation du faisceau incident, et qu'il est rejeté vers la paroi supérieure de l'espace protégé, sur

laquelle il donne naissance à un maximum d'impression dû à de nouveaux rayons, secondaires eux-mêmes par rapport aux rayons qui les produisent.

La déviabilité magnétique de ces rayons permet de les assimiler aux rayons secondaires dérivés des rayons X, qui, d'après les expériences de MM. Curie et Sagnac, transportent des charges électriques négatives.

La même épreuve montre encore divers autres effets secondaires provoqués par les rayons pénétrants qui ont traversé le plomb ou l'étain et dont il va être question plus loin.

§ 2. — *Transmission du rayonnement au travers de lames épaisses de verre ou de métal. Rayons secondaires.*

Les expériences précédentes, en permettant d'analyser les effets de pénétration des rayons inégalement déviables, ont donné les raisons des divergences observées par divers expérimentateurs dans la transmissibilité du rayonnement au travers des métaux. Elles rendent inutile la publication de nombreuses expériences que j'avais faites pour démontrer qu'une partie déviable du rayonnement traversait des écrans métalliques, en donnant au travers de ceux-ci des ombres déviées.

Je citerai seulement l'expérience suivante : Sur une plaque photographique placée dans le champ d'un électro-aimant, on dépose une petite cuve de plomb contenant un sel de radium ; au-dessus on place une lame de plomb recourbée de façon à présenter deux montants verticaux (fig. 37 et 38, Pl. VI) et, d'un côté, on interpose entre la

source et la lame de plomb, une lame plane d'aluminium de $0^{mm},1$ d'épaisseur. Si l'on fait d'abord agir le champ de façon à rejeter le faisceau déviable du côté où n'est pas la lame d'aluminium, celui-ci donne lieu à une ombre projetée assez nette. Si l'on renverse le sens du courant, l'ombre projetée au travers de l'aluminium se voit encore, mais elle est recouverte par l'impression d'un faisceau secondaire issu de la lame d'aluminium et qui a été ramené sur la plaque. Je n'insisterai pas davantage sur cette expérience, ni sur d'autres, montrant que certains rayons déviables peuvent traverser réellement les écrans métalliques: ce fait est surabondamment prouvé par les expériences d'analyse magnétique décrites plus haut.

Rayons déviables. — La pénétrabilité des rayons peu déviables est assez grande ; l'expérience suivante en donne une nouvelle démonstration différente de celle qui résulte des épreuves déjà citées : on superpose trois plaques photographiques, les gélatines tournées toutes en dessus, et on les enveloppe ensemble dans le même papier noir; on place le tout dans le champ d'un électro-aimant. Sur le papier de la plaque supérieure on pose une petite cuve de plomb contenant un sel de radium dans un petit trou rond, puis à l'extrémité de la plaque à une distance de la source de 4^c on met une petite rondelle de plomb de 1 millimètre d'épaisseur et de 5 millimètres de diamètre. On aimante l'électro-aimant de façon à rejeter le faisceau déviable sur la rondelle de plomb. Dans cette expérience l'intensité du champ magnétique était 2 600. En développant les plaques on trouve sur la première une impression intense, dont le maximum sous le papier noir

correspond à RH = 1400, puis à l'extrémité de la plaque une impression faible donnant une ombre de la rondelle pour des rayons tels que RH = 5000. Ces rayons traversent le verre de la première plaque photographique soit $1^{mm},5$ de verre environ et impressionnent la seconde à partir de RH = 3000; ils donnent sur cette deuxième plaque une ombre de la rondelle. On n'observe sur la troisième plaque aucune trace de la rondelle de plomb. Les rayons en question ne paraissent pas avoir traversé la petite rondelle de plomb. Ces rayons déviables très pénétrants donnent des impressions faibles parce qu'ils ne sont pas absorbés; ils ne produisent que de faibles actions chimiques ou physiques, qui ne peuvent nous donner aucune indication sur leur intensité véritable. C'est ainsi que se comporteraient, par exemple, des rayons lumineux rouges intenses qui traverseraient une plaque photographique sans l'impressionner, parce que ces rayons ne sont pas absorbés par le sel d'argent.

Une autre expérience, qui sera utilement rapprochée de celles qui vont suivre, consiste à disposer dans un champ magnétique, parallèlement l'une au-dessus de l'autre, à quelques millimètres de distance, deux plaques photographiques enveloppées de papier noir et dont les gélatines sont tournées l'une vers l'autre. Sur le verre de la plaque supérieure on place la source radio-active, la petite cuve formant une source ponctuelle, et sur la gélatine de la plaque inférieure une petite bande de plomb. Dans le faisceau ramené sur les plaques par le champ magnétique, la partie pénétrante traverse le verre de la plaque supérieure et vient exciter sur la bande de plomb

des rayons secondaires qui impressionnent à distance la plaque supérieure.

Dans cette expérience on n'a pas observé d'impression due à des rayons secondaires du plomb qui auraient pu être ramenés par le champ magnétique sur la seconde plaque photographique.

Rayonnement non déviable. — Dans les expériences précédentes, on trouve sous la petite cuve de plomb une tache très intense due à des rayons qui ont traversé le fond de la cuve de plomb. Cette tache se retrouve sur les trois plaques superposées dont chacune a environ $1^{mm},5$ d'épaisseur et les rayons qui les produisent traverseraient des épaisseurs de verre beaucoup plus grandes. Ces rayons ne sont pas déviés par l'aimant. J'avais déjà signalé cette très grande pénétrabilité de certains rayons au travers du plomb (1), quand M. Villard (2) publia une expérience fondamentale montrant que ces rayons différaient totalement des rayons déviables. En recevant sous une incidence presque rasante sur une plaque photographique enveloppée de papier noir, et soumise à un champ magnétique le rayonnement émis par un petit tube de verre contenant du chlorure de baryum radifère peu actif, M. Villard reconnut, à côté du faisceau dévié, un faisceau non dévié assez pénétrant pour traverser une lame de plomb de $0^{mm},2$ d'épaisseur. Ces rayons n'avaient apparu qu'à la suite de la longue pose rendue nécessaire par la faiblesse de l'émission et la disposition de l'expé-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 374 (février 1900).
(2) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 1012 (avril 1900).

rience, et c'est ce qui explique comment on ne les avait pas observés en recevant directement sur des plaques photographiques le rayonnement de corps plus actifs pour lesquels une pose de quelques minutes était suffisante.

On a déjà vu, plus haut, que ces rayons, n'étant que très peu absorbés, produisent une action photographique faible qui ne donne aucune idée de leur intensité.

Au contraire, lorsqu'ils traversent un corps absorbant tel que le plomb ou le verre, la partie absorbée se transforme en rayons secondaires très absorbables et par suite très actifs; dans ces conditions, en quelques minutes, on observe la trace de ces rayons. C'est ainsi qu'on obtient sous une petite cuve de plomb au travers de 1 millimètre d'épaisseur une impression en quelques minutes de pose. Toutes les épreuves obtenues avec des petites cuves de plomb posées sur les plaques photographiques manifestent ce phénomène.

L'interposition des corps absorbants, substituant au rayonnement pénétrant un rayonnement secondaire, peut être comparée à l'interposition d'un écran fluorescent sur le trajet de rayons excitateurs invisibles; l'écran rend visible leur présence en leur substituant des rayons lumineux.

L'expérience de M. Villard a montré ce fait important qu'on pouvait, en prolongeant la pose, obtenir sur une plaque photographique la trace de rayons dont on n'avait observé jusque-là que les effets de pénétration et de transformation.

Encore est-il probable que, dans cette expérience, les effets secondaires provoqués par les rayons pénétrants sur

le verre de la plaque jouent un rôle important dans l'impression.

J'ai répété plus tard l'expérience de M. Villard en la modifiant de la manière suivante : deux plaques photographiques superposées ont été placées verticalement, sans être enveloppées de papier noir, dans le champ magnétique d'un aimant permanent. Deux blocs d'étain limitaient un large faisceau issu de la petite cuve linéaire contenant du radium et couverte d'aluminium, dont il a été question plus haut, et une petite plaque de plomb était disposée sur le trajet des rayons non déviables. Les diverses pièces métalliques étaient collées sur une lame de verre et pressées contre la couche sensible de la première plaque. L'impression sur la première plaque est conforme à la description que M. Villard a faite de son expérience ; le faisceau dévié est séparé du faisceau non déviable. On remarque incidemment que ce dernier faisceau donne des ombres projetées des écrans qu'il rencontre.

On observe en outre que le faisceau non déviable est bordé de deux lignes noires fines (fig. 65, Pl. XI).

Au delà de la lame de plomb ces lignes s'expliqueraient par la diminution d'intensité de la partie centrale à la suite de l'absorption par la lame de plomb, mais cette explication ne convient pas pour rendre compte de la présence de ces bordures plus noires dans le voisinage des blocs d'étain et avant que le faisceau non déviable ait rencontré la lame de plomb. Entre les deux blocs d'étain ce sont des effets secondaires du métal. Au delà on pourrait les attribuer à des rayons émis tangentiellement par les surfaces métalliques, cependant l'obliquité de l'une des lignes

n'autorise pas à formuler sans réserves cette hypothèse.

Un des points intéressants de cette nouvelle expérience est l'impression obtenue sur la deuxième plaque, au travers du verre de la première qui a $1^{mm},5$ d'épaisseur. Les rayons déviables n'ont produit aucune action, mais les rayons non déviables ont donné une trace notablement plus intense que sur la première plaque, avec deux lignes plus noires sur les bords du faisceau rectiligne divergent (fig. 66, Pl. XI). Cet effet est dû aux rayons secondaires excités par les rayons pénétrants sur la face de sortie du verre en contact avec la seconde plaque photographique.

Sous l'incidence presque rasante les rayons qui font leur impression à l'extrémité de la seconde plaque photographique ont ainsi traversé près de deux centimètres de verre.

Cette expérience est importante parce qu'elle sépare les effets secondaires produits, d'un côté, par le rayonnement déviable, et, de l'autre, par le rayonnement très pénétrant non déviable.

Antérieurement j'avais réalisé d'autres expériences qui ont été également instructives.

La première a consisté à placer sur une plaque photographique, enveloppée de papier noir, le petit bloc de plomb contenant la matière active réunie dans une fente linéaire et qui avait servi à diverses expériences depuis près d'un an (du 27 mars 1900 au 12 février 1901). Ce bloc avait les dimensions suivantes : $34^{mm},5 \times 21^{mm},2$ de base sur $7^{mm},5$ de haut. La rainure avait $1^{mm},64$ de profondeur, 1 millimètre de large sur $20^{mm},5$ de longueur; la matière active était rassemblée au milieu sur 10 millimètres de longueur environ

L'épreuve développée au bout de 2 jours et reproduite (fig. 63, Pl. X) montre la trace rectangulaire de la base du bloc produite par le rayonnement secondaire, ainsi que des impressions dues à des rayons émis, soit par la source soit par les faces latérales du parallélipipède de plomb. Il semble que l'impression soit principalement due à des rayons secondaires, car les rayons directs filtrés par une épaisseur de 1 centimètre de plomb doivent être trop pénétrants pour impressionner la plaque photographique.

On a donc ainsi un moyen d'isoler, par filtration au travers d'une grande épaisseur de métal, des rayons extrêmement pénétrants, qui n'impressionnent pas directement une plaque photographique; mais on pourra cependant les recueillir en les recevant sur une lame absorbante qui les arrête partiellement et sur laquelle ils provoquent des phénomènes secondaires révélant leur présence.

On réalise ainsi une expérience paradoxale qui consiste à n'observer d'action que sous des écrans opaques qui sembleraient au contraire devoir protéger les plaques photographiques.

De nombreuses expériences de transformation de ces radiations avec divers métaux ont été ainsi réalisées. On en citera seulement quelques-unes.

Trois plaques photographiques, superposées, la gélatine en dessus, ont été enveloppées de papier noir. Sur la face supérieure, du côté de la gélatine de la plaque supérieure, on a posé d'abord une très mince feuille de mica, puis une lame mince d'aluminium, de $0^{mm},1$ d'épaisseur, puis couvrant en partie celle-ci, une bande de plomb de 1 millimètre d'épaisseur, et enfin en croix sur la bande

de plomb le petit bloc contenant la matière active (fig. 26). L'épreuve fig. 64, Pl. X (A. 16-2-01) développée au bout de 48 heures a montré diverses particularités importantes. Non seulement la silhouette de la base du bloc, qui était à plus de 1 millimètre de la plaque, est apparue avec une impression uniforme intense, mais encore la silhouette de la bande de plomb, avec une intensité un peu moindre et enfin avec une intensité encore moindre la région couverte par l'aluminium.

On remarquera que la silhouette de la lame de plomb se détache en plus clair sur celle de la base du bloc, ce qui montre qu'elle est produite par des rayons plus pénétrants que ceux qui ont excité le rayonnement secondaire du bloc de plomb. Les rayons les moins pénétrants ont en effet été arrêtés par ce dernier. Sous ces écrans l'impression est plus forte qu'en dehors. Le rayonnement secondaire a traversé le mica, ce qui exclut l'hypothèse d'une action due à des vapeurs métalliques.

Fig. 26.

Les deux bords de la bande de plomb, le bord de la lame d'aluminium parallèles à la direction de la source lumineuse projettent des ombres qui apparaissent en blanc sur la figure. Ces bords interceptent le rayonnement direct car l'ombre de l'un d'eux se voit au travers de la lame d'aluminium. Les rayons directs qui provoquent le rayonment secondaire de l'aluminium ont donc été arrêtés par le bord de la bande de plomb. Les faces des dièdres verticaux aux quatre angles du petit bloc parallélipipède projettent aussi des ombres qui traversent l'aluminium. Ces ombres se voient également dans l'épreuve précédente.

Si l'on examine les autres plaques photographiques qui ont été impressionnées au-dessous de la première, on retrouve sur la seconde les mêmes silhouettes beaucoup plus diffuses et les ombres portées plus étendues. Sur la troisième plaque les silhouettes ont à peu près disparu pour faire place à une impression intense due à des rayons très pénétrants qui se transforment à la sortie du verre de la deuxième plaque.

Les parties métalliques atteintes par le rayonnement dans le voisinage de la source émettent donc un rayonnement secondaire assez intense et assez pénétrant pour traverser deux lames de verre de $1^{mm},6$ environ d'épaisseur chacune.

L'expérience suivante a donné des épreuves très intéressantes. On a enveloppé de papier noir deux plaques photographiques 18×24 superposées. Sur la face supérieure de l'une d'elles, du côté de la gélatine, on a posé une lame de mica très mince, puis une lame de plomb de $1^{mm},08$ d'épaisseur découpée suivant la forme indiquée ci-contre (fig. 27), et divers morceaux de plomb; enfin dans la région centrale de cette lame de plomb, on a posé la petite cuve dont il a été question dans les expériences précédentes (1). La source était en outre recouverte d'une petite bande de plomb contournée qui venait ensuite reposer sur le mica comme les autres lames de plomb.

Les deux épreuves, développées au bout de 48 heures,

---

(1) La partie de la figure 27 qui représente à part la petite cuve contenant la matière active, n'est pas à la même échelle que la plaque de plomb découpée.

ont été particulièrement belles et intéressantes. Sur la première plaque (fig. 69, Pl. XII, A 18-2-01), on observe d'abord que la silhouette des lames de plomb est marquée par une impression secondaire, intense dans le voisinage de la source, impression qui va en s'affaiblissant graduellement à mesure qu'on s'éloigne de la source. Cet effet est dû surtout à ce que le rayonnement oblique est obligé de traverser des épaisseurs de plomb de plus en plus grandes avant d'exciter les radiations actives à la sortie. Cet affaiblissement s'observe particulièrement en h

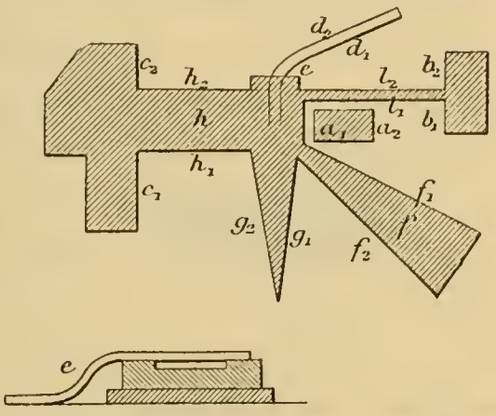


Fig. 27.

Les bords des lames de plomb présentent deux effets inverses : du côté qui ne reçoit pas le rayonnement on observe des ombres portées d'autant plus larges que le rayonnement qui atteint la plaque en ces régions est plus oblique, telles sont les ombres observées sous forme de bandes blanches en a_2 d_2, f_2, g_1, g_2, h_1, h_2, l_2. Les bandes blanches l_2, h_1, h_2 pénètrent même dans l'intérieur des projections des lames de plomb, montrant que les bords font l'office d'écrans qui interceptent le rayonnement direct, et, par suite, suppriment, dans les ombres portées, le rayonnement secondaire qui produit les impressions étudiées.

Du côté où ils reçoivent le rayonnement, les bords des lames sont le siège d'une impression plus intense que sous les autres parties de ces lames, de sorte que ces bords

présentent des bandes noires estompées vers l'intérieur des lames. Tels sont les maxima observés en a_1, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, f_1. L'explication de ce fait est simple : Les rayons très pénétrants qui rencontrent la lame en A près du pied du bord ont à traverser une très faible épaisseur de matière, ils sont à peine affaiblis et provoquent sur place un rayonnement secondaire intense, en A (fig. 28), les rayons qui pénètrent en B auront à traverser une épaisseur d'autant plus grande que B sera plus voisin de C et ils donneront en b un rayonnement secondaire provoqué par des rayons plus pénétrants, ou par des rayons affaiblis, et, en tous cas, ce rayonnement sera moins absorbable que celui qui est produit en A ; l'impression photographique sera donc moins intense, et l'impression sous la lame ira en décroissant de A à C. A partir de C tous les rayons obliques donneront une impression qui sera uniforme si l'obliquité est constante, et qui ira en décroissant comme en h, si l'obliquité est croissante.

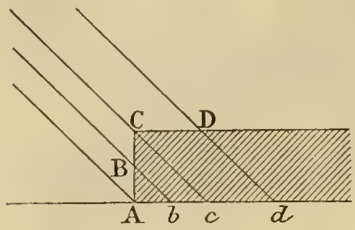


Fig. 28.

En e (fig. 27) le maximum observé est dû à ce que le rayonnement filtré par le bloc de plomb rencontre la bande de plomb en dessous du côté qui est tourné vers la plaque.

Si maintenant on examine la deuxième plaque qui a été impressionnée au-dessous de la première, c'est-à-dire au travers d'une lame de verre de 2 millimètres d'épaisseur, on voit que toute la plaque est comme voilée par le rayonnement secondaire excité sur le verre de la première plaque. Sur ce voile général faible, se détachent en clair

toutes les ombres portées de l'épreuve ci-dessus h_1, h_2, l_2; toute la plaque d_1, d_2 dans l'ombre portée par e; f_1, f_2, ainsi que g_1, g_2.

Au-dessous de la source elle-même l'impression est excessivement intense, elle se prolonge faiblement au milieu des projections des diverses lames montrant que celles-ci n'ont pas arrêté tout le rayonnement incident ou que les rayons émis par les lames de plomb ont traversé en partie le verre. Cette pénétrabilité des rayons secondaires se rencontre surtout dans les rayons émis par le bloc lui-même qui reçoit et transforme le rayonnement le plus intense; la silhouette de la base de ce bloc se devine dans la partie la plus intense; cependant la régularité de la répartition du maximum d'intensité autour de la source est telle qu'on doit attribuer la majeure partie de cette impression intense à des rayons émis directement par la source, filtrés par le plomb, et transformés par le verre de la première plaque.

On peut vérifier par d'autres expériences l'exactitude des conclusions développées ci-dessus. Par exemple, si l'on dépose sur une plaque photographique, enveloppée de papier noir et couverte d'une feuille de mica, une lame prismatique de plomb d'un très petit angle et qu'on fasse tomber sur celle-ci des rayons du radium filtrés par une épaisseur notable de métal, on constate le décroissement progressif de l'intensité du rayonnement secondaire de la face inférieure à mesure que l'épaisseur de la lame augmente.

Nous n'avons parlé jusqu'ici que du rayonnement pénétrant filtré par le plomb. Les mêmes phénomènes se

produisent avec le rayonnement filtré au travers du cuivre ou d'autres métaux.

On peut encore étudier à la fois le rayonnement excité sur les deux faces de lames de verre, de métaux divers ou d'autres substances, en plaçant celles-ci entre deux plaques photographiques dont les gélatines sont toutes deux tournées vers l'intérieur, et en excitant ce système au travers du verre de l'une des plaques. Le rayonnement secondaire excité sur la face des lames exposée au rayonnement incident donne une action photographique plus intense que celui qui est excité sur l'autre face.

Il résulte de ces expériences que le verre qui sert de support à la gélatine des plaques photographiques joue un rôle important dans les impressions obtenues.

J'ai répété des expériences semblables aux précédentes avec l'uranium et le thorium. On a posé sur des plaques photographiques, enveloppées ou non enveloppées de papier noir, des lames de plomb sur lesquelles reposaient des morceaux d'uranium métallique, ou une cuve d'étain dont le fond avait plus de 1 centimètre d'épaisseur, et qui contenait de l'oxyde de thorium. Les impressions ont été semblables à celles qu'on obtient, avec une pose courte, au travers du fond des petites cuves de plomb contenant du radium.

La pose a été de 19 jours pour l'uranium et de 22 jours pour le thorium. Des rayons pénétrants ont donné une silhouette des corps actifs au travers du métal, mais les écrans métalliques et la base de la cuve se détachent en clair sur le fond voilé par les rayons directs ou secondaires, suivant les conditions des expériences.

Une feuille de mica partiellement interposée entre les lames de plomb et la plaque photographique apparaît en clair sous la totalité de l'écran métallique, montrant l'existence de rayons très faibles émis par les surfaces de plomb traversées. La faible intensité du rayonnement incident et par suite la faiblesse des radiations transformées semblent la cause pour laquelle on n'obtient pas d'impression notable sous la totalité des écrans, comme cela se produit avec le radium dans les expériences qui précèdent. L'apparence est la même qu'avec les petites cuves de plomb contenant du radium et posées pendant quelques instants sur les plaques photographiques (fig. 35 et 36, Pl. VI). Les radiations secondaires excitées par les rayons qui ont traversé le plomb sont trop peu intenses pour donner, dans ces conditions, une impression appréciable.

§ 3. — *Rayonnement pénétrant du polonium et rayons secondaires produits par ce rayonnement.*

Le rayonnement du polonium ne comprend pas seulement les rayons très absorbables dont nous avons démontré plus haut l'identification avec les rayons α du radium et avec les Kanalstrahlen de M. Goldstein.

J'ai pu (1) mettre en évidence l'existence des rayons très pénétrants qui n'apparaissent qu'après une longue pose photographique et se révèlent par les effets secondaires qu'ils produisent.

---

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, t. CXXXVI, p. 977.

Déjà, en 1901, j'avais eu l'occasion de reconnaître certains effets de pénétration des rayons du polonium, en étudiant les effets secondaires (1).

L'expérience était la suivante : je possédais alors depuis un an une petite quantité d'azotate de polonium mélangé à du bismuth, qui m'avait été donné par M. Curie. Ce produit, qui alors était déjà affaibli, avait été déposé dans une petite auge rectangulaire de 4 mm. sur $2^{mm},5$ de section découpée dans une feuille de carton et fermée à la partie inférieure par une feuille de mica collée à plat sur les parties pleines. La petite auge fut posée sur une plaque photographique non enveloppée, et fut recouverte d'une petite gouttière demi-cylindrique de 11 millimètres de diamètre, formée en partie de plomb et en partie d'aluminium. Au bout d'une quinzaine de jours de pose on obtint sur la plaque : d'une part, une impression faible due à des rayons secondaires venant du cylindre métallique et, d'autre part, une impression très intense au-dessous de la source, reproduisant la projection de section de l'auge au travers du papier. Or, une feuille de mica, placée sur la matière active, arrête les rayons du polonium. La même expérience fut reprise en formant le fond de l'auge par du carton, le rayonnement fut arrêté, et les rayons secondaires émis par le demi-cylindre supérieur produisirent seuls une impression très notable. Dans ces expériences, on pourrait craindre que les impressions fussent dues à des rayons lumineux émis par la préparation active, mais qui seraient trop

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, t. CXXXIII, p. 735.

faibles pour être reconnus avec la vue. Des expériences faites plus tard au travers du papier noir ont montré qu'on était en présence de radiations actives autres que les radiations lumineuses.

Les produits qui ont servi à ces expériences ont perdu, depuis, une partie de leur activité.

M. et Mme Curie ayant eu l'obligeance de me prêter, en vue de l'expérience de déviabilité magnétique signalée plus haut, quelques grains d'une préparation de polonium métallique autrefois très active, mais notablement affaiblie aujourd'hui, j'ai profité de ce produit pour répéter et compléter mes observations antérieures.

Les grains métalliques ont d'abord été placés dans une petite cuve dont les parois étaient formées par une petite bande de plomb de 1 millimètre d'épaisseur et de 3 millimètres de hauteur environ, et dont le fond était constitué par une petite feuille de papier noir; sur la moitié du fond, on avait collé une lame mince de mica qui débordait de plusieurs centimètres sur tout un côté de la cuve; on a posé ce dispositif sur la gélatine d'une plaque photographique, et on a recouvert la cuve avec la petite gouttière métallique qui avait servi aux anciennes expériences.

L'épreuve, développée au bout de dix-sept jours, a montré une impression intense sous la cuve, dessinant la projection de celle-ci (fig. 18, Pl. IV). L'impression s'est faite au travers du mica, bien qu'un peu affaiblie par cet écran. En même temps, on observe qu'un faisceau émané directement du polonium, au travers d'une fissure des parois de plomb, a impressionné la plaque sur la partie non protégée, mais n'a pas traversé le mica.

Enfin, les rayons secondaires émis par la gouttière métallique ont donné une impression notable, qui a également traversé le mica, tout en s'affaiblissant.

On a répété alors une expérience toute semblable, en couvrant entièrement de mica la plaque photographique, et en substituant à la petite cuve à fond de papier une cuve entièrement en plomb épais, puis on a couvert celle-ci avec une gouttière en plomb un peu plus grande que celle que l'on avait employée précédemment.

Au bout de quatorze jours de pose, on a obtenu, au travers du mica, sous le cylindre, une impression presque uniforme, au milieu de laquelle une partie un peu plus claire marque la place de la cuve. Des rayons pénétrants ayant traversé le fond ont donné une impression moins forte que celle des rayons secondaires excités par le rayonnement sur la paroi interne de la gouttière qui recouvrait la cuve.

Si l'on couvre la cuve avec du papier noir, on arrête les rayons α; l'expérience faite avec une cuve à fond de papier, fermée en dessus par du papier noir, a montré, au bout de huit jours, une impression secondaire faible produite par le cylindre de plomb; si l'on tient compte du temps de pose, qui est la moitié de celui des expériences précédentes, on peut en conclure que les rayons secondaires sont produits, sinon en totalité, du moins en majeure partie, par un rayonnement pénétrant autre que celui qui constitue les rayons α.

Dans cette dernière expérience, la moitié seulement de la plaque photographique était couverte de mica. L'impression au travers du fond de papier a été très intense,

même au travers du mica. L'impression s'étend à toute la partie formant le fond et affecte le caractère des impressions observées avec le radium.

L'expérience suivante achève de démontrer l'existence de ces rayons pénétrants :

Sur une plaque photographique entièrement couverte par une lame très mince de mica, on a posé, à même sur le mica, un gros grain de polonium métallique ayant environ $3^{mm},5$ de diamètre; puis latéralement, à une distance de 2 centimètres de ce grain, on a mis sur la plaque une sorte de gouttière renversée, en plomb, de 1 centimètre de diamètre, de $3^{c},5$ de long, de 1 centimètre de haut, dont l'axe était perpendiculaire à la direction moyenne passant par le grain de polonium (fig. 29). Du côté exposé au rayonnement du polonium, la gouttière présentait une paroi dont une partie avait été légèrement repliée vers l'intérieur, et dont l'autre partie, restée verticale, comprenait une partie pleine en plomb de 1 millimètre d'épaisseur, puis deux fenêtres fermées, l'une par une lame d'aluminium, l'autre par une lame de cuivre, chacune de $0^{mm},10$ d'épaisseur.

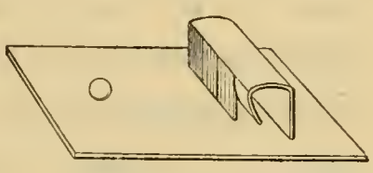


Fig. 29.

L'épreuve a été développée au bout de 10 jours de pose. Elle est reproduite (fig. 17, Pl. IV). Au-dessous de la position qu'occupait le grain, on remarque une tache ronde de 5 millimètres environ de diamètre s'étendant à peine à quelques millimètres au delà par diffusion, et au centre de laquelle, dans l'impression très intense, on peut distinguer la projection de la surface du grain de polo-

nium et des inégalités de la surface. Puis latéralement, à 2 centimètres de distance, on voit une impression uniforme sur toute la partie qui était recouverte par la gouttière de plomb. Les rayons α du polonium n'ont pas traversé le mica; l'impression sous la source, qui ressemble aux taches observées sous les petites cuves de plomb contenant du radium, est due à des rayons secondaires provoqués à la sortie du mica par des radiations pénétrantes dont l'action s'est affaiblie progressivement à mesure que l'épaisseur de la matière traversée obliquement a été plus grande. La gouttière en plomb a été atteinte par des rayons pénétrants qui ont traversé les divers métaux et, entre autres, une épaisseur de 1 millimètre de plomb. Ces rayons ont provoqué des rayons secondaires sur toute la surface intérieure de la gouttière. Il n'en ont pas excité du côté de la face d'entrée exposée au polonium; à la sortie de la paroi située du côté de l'incidence, on remarque des maxima d'action derrière le cuivre et derrière le plomb, une action un peu moindre que les précédentes derrière l'aluminium, et un maximum tout le long du bord intérieur de la paroi du fond. En regard de la portion de paroi un peu repliée à l'intérieur et présentant au rayonnement incident une face inclinée vers la plaque photographique, il n'y a pas eu d'impression. L'action n'apparaît qu'à l'intérieur, après avoir traversé la paroi. Enfin, on constate que, sauf un très léger voile, il n'y a pas d'impression ni en avant ni au delà de la gouttière métallique.

Ces divers détails ont tous leur importance, et concordent pour montrer que ces rayons pénétrants produisent des

effets tout à fait semblables à ceux des rayons pénétrants du radium filtrés par une notable épaisseur du métal.

Des trois parties distinctes qui constituent le rayonnement du radium, il semble donc que le rayonnement du polonium en possède deux, et que la partie de nature cathodique soit la seule dont on n'ait pu reconnaître la présence.

§ 4. — *Considérations sur quelques particularités que présentent les radiographies obtenues avec les corps radioactifs.*

Lorsque des lames de verre, des métaux ou des objets sont disposés près d'une plaque photographique, et reçoivent le rayonnement d'un corps radioactif tel que l'uranium ou le radium, les contours des radiographies de ces objets offrent différents aspects; du côté exposé au rayonnement, on observe un renforcement de l'action photographique, et de l'autre un minimum qui correspond à une ombre portée dans laquelle les autres objets sont protégés contre le rayonnement incident.

Considérons d'abord les effets produits sur le côté exposé au rayonnement; si les lames reposent sur la plaque photographique, ou sont très près de celle-ci, et si le rayonnement les frappe presque normalement, les faces latérales donnent un effet secondaire intense *extérieur* au contour des lames; si le rayonnement est oblique et pénétrant, l'effet extérieur peut s'annuler, et l'on observe à l'*intérieur* du contour une impression qui va en décroissant à partir du bord, et se maintient ensuite sensiblement constante si l'obliquité relative du rayonnement ne change

pas notablement sur toute l'étendue de la surface couverte par la lame considérée. S'il arrive que celle-ci soit distante de quelques millimètres de la plaque photographique, le contour n'est pas la projection oblique de l'arête inférieure, mais il est limité par un maximum diffus dans le voisinage de la projection orthogonale des faces latérales de la lame.

Le long des bords opposés, on observe une ombre portée limitée extérieurement à la projection conique des arêtes supérieures des lames, et s'arrêtant intérieurement à la projection orthogonale des arêtes inférieures.

Parfois on observe de ce côté un renforcement *intérieur* qui apparaît en même temps que le renforcement *extérieur* de l'autre bord dont il vient d'être parlé.

Ces différentes particularités peuvent s'expliquer par les effets du rayonnement secondaire excité sur les faces inférieures des lames par un rayonnement assez pénétrant pour les avoir traversées. Ce rayonnement secondaire s'affaiblit très vite à une petite distance des points excités, et impressionne surtout la plaque photographique dans le voisinage de la projection orthogonale de ces points.

Du côté exposé au rayonnement les parties de la face inférieure voisines du contour sont excitées par des rayons obliques qui ont traversé les faces latérales sous des épaisseurs d'autant moindres qu'ils passent plus près de l'arête inférieure. Ces rayons sont donc d'autant moins affaiblis et le faisceau d'autant moins dépouillé de rayons moins pénétrants, et ils excitent sur les régions qu'ils atteignent à leur sortie un rayonnement secondaire dont

l'activité sur la plaque photographique va en décroissant à partir de l'arête inférieure. Nous avons déjà vu plus haut cette explication.

De l'autre côté, les limites de l'ombre portée peuvent s'expliquer par le fait que le faisceau incident est dépouillé des rayons très actifs sur la plaque par son passage au travers d'une petite épaisseur de la substance, et que les rayons secondaires émis par la face de sortie, en C_1 ou B_1 (fig. 30), sont émis sensiblement normalement et sont trop affaiblis pour atteindre la plaque en c_1 ou en b_1.

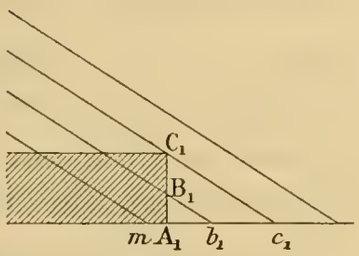


Fig. 30.

L'impression sous la lame, en m, résulterait des rayons secondaires, émis à la face de sortie.

Ces considérations n'expliquent pas les renforcements qu'on observe souvent à l'extérieur du côté exposé au rayonnement et quelquefois à l'intérieur entre A_1 et m du côté opposé. Pour le renforcement extérieur on peut admettre comme conforme aux expériences précédentes que les rayons directs frappant la face A C (fig. 31), sans avoir subi l'absorption au travers de la substance, excitent des rayons secondaires plus pénétrants, moins diffusés dans l'air qui peuvent impressionner la plaque entre A et p; on pourrait encore invoquer un phénomène de réflexion diffuse du rayonnement incident.

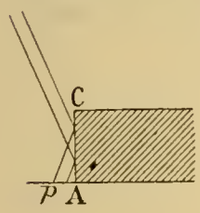


Fig. 31.

L'existence d'un maximum entre A_1 et m à l'intérieur est plus difficile encore à interpréter; elle fait penser au

phénomène de la réflexion totale, et il semblerait que le rayonnement qui n'apparaît pas en A_1 b_1 (fig. 30) se retrouve en A_1 m, à l'intérieur, mais on n'a aucune expérience qui autorise cette manière de voir.

Au contraire, chaque fois qu'on fait une expérience analogue avec des rayons lumineux ou simplement en n'interceptant pas la lumière émise par le radium, on trouve ces maxima intérieurs très nets et dus, dans ce cas, à une réflexion totale sur les faces verticales des bords des lames.

Dans l'épreuve unique citée au début de ce mémoire (fig. 5, Pl. II) et obtenue au travers de 2 millimètres d'aluminium par le rayonnement issu d'une préparation phosphorescente de sulfure de calcium, ce phénomène est tellement semblable à celui que produit la lumière qu'il laisse encore penser, à défaut d'autre explication connue, qu'il a pu être produit par des rayons de la même nature que les rayons lumineux et qui auraient traversé l'aluminium.

CHAPITRE VII

EXPÉRIENCES DIVERSES RELATIVES AU RAYONNEMENT DE L'URANIUM ET DU RADIUM

§ 1. — *Émission du rayonnement pénétrant de l'uranium à la température de l'air liquide.*

On a vu, au commencement de ce mémoire (page 67), que l'émission du rayonnement de l'uranium ne subissait pas de variation notable entre — 20° et + 100°. Je me suis proposé ultérieurement de compléter mes premières observations et (1) d'étudier cette émission à la température de l'air liquide; mais cette expérience, en raison des phénomènes d'absorption qu'elle présente, n'a pu être exposée en même temps que les expériences précédentes qui s'appliquaient au rayonnement total.

L'expérience était disposée de la manière suivante : un cylindre de cuivre vertical, de 63 millimètres de diamètre et de 87 millimètres de hauteur, est entouré d'un manchon

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t CXXXIII, p. 199 (22 juillet 1901) et p. 980 (9 déc. 1901).

plein d'eau qui maintient la température intérieure constante; il est fermé à sa partie inférieure par une feuille très mince d'aluminium battu. A l'intérieur, dans l'axe du cylindre, est disposée une tige métallique portant un petit plateau de cuivre horizontal et distant de 45 millimètres du fond; la tige est isolée et reliée à la feuille d'or d'un électromètre de Hankel très sensible. Le cylindre, isolé lui-même, est maintenu à un potentiel constant par une pile à eau, zinc et cuivre, qui, suivant les expériences, a varié de 40 à 50 éléments. Cet appareil diffère peu de celui qui est représenté fig. 10, page 73.

On a placé alors sous l'appareil, à une distance de 13 millimètres du fond, le disque d'uranium métallique de 67 millimètres de diamètre dont il a été question au commencement de ce travail.

Dans ces conditions, la température ambiante étant de 24°,8, le système isolé se chargeait et le courant dû à l'ionisation de l'air par l'uranium élevait le potentiel du système isolé de $0^{v},108$ par seconde.

Le courant a pour mesure le produit de la capacité par la variation du potentiel exprimée en volts par seconde. Pour abréger, dans ces expériences et dans celles qui vont suivre, nous donnerons seulement la valeur de la variation du potentiel en une seconde comme mesure relative du courant.

Le disque reposait sur le fond d'une boîte plate de carton, ouverte : on a alors versé sur le métal de l'air liquide jusqu'à ce que celui-ci fût en excès dans la boîte et se maintînt en ébullition. A mesure que la température baissait, on voyait la vitesse de la charge de l'électro-

mètre se ralentir et quand l'uranium eut atteint la température du liquide bouillant, le courant produit par l'ionisation fut réduit à moitié.

L'air froid se déversait tout autour de la boîte de carton éloignant l'air humide, de sorte qu'il n'y eut de précipitation de vapeur d'eau sur le disque qu'à une période ultérieure du réchauffement. Lorsque le disque en se réchauffant eut atteint la température de fusion de la glace, le courant correspondait à une charge de $0^{v},096$ par seconde. A l'intérieur du cylindre la température de l'air n'avait pas sensiblement varié.

Le tableau suivant résume les nombres obtenus.

TEMPÉRATURES.	COURANT POUR UNE DISTANCE DE $0^{mm},13$ DU DISQUE D'URANIUM A L'APPAREIL.	
°	v	
24,8	0,108	1
0	0,096	0,88
— 181,5 (air liquide)	0,054	0,50

Cette diminution ne doit pas être attribuée à une diminution dans le rayonnement de l'uranium lorsque ce métal est refroidi; elle est principalement due à l'absorption considérable produite par la couche d'air dont la densité a beaucoup augmenté par le refroidissement. On peut le démontrer, d'abord en augmentant un peu la distance entre le disque et l'appareil et constatant que, pour un abaissement de 1 centimètre, le courant dans l'appareil diminue environ de moitié, puis, en montrant que la même variation de distance réduit beaucoup moins le courant

lorsque celui-ci est produit seulement par des rayons pénétrants capables de traverser une lame d'aluminium de $0^{mm},1$ d'épaisseur.

Voici les valeurs du courant obtenues à la température ambiante pour les distances de 13 et 23 millimètres du disque d'uranium à l'appareil, d'une part sans couvrir le disque, et d'autre part en le couvrant d'une lame d'aluminium de $0^{mm},1$ d'épaisseur.

DISTANCES.	COURANT OBSERVÉ AVEC L'URANIUM				RAPPORTS des deux courants.
	découvert.		couvert d'une lame d'aluminium.		
mm	v		v		
13	0,1077	1	0,0371	1	0,345
23	0,0509	0,473	0,0291	0,785	0,572

Ces nombres montrent que la diminution observée plus haut est due en grande partie à l'absorption par l'air.

On peut opérer autrement : enfermer le disque d'uranium dans une cloche renversée (fig. 32), fermée elle-même par une lame d'aluminium de $0^{mm},1$ d'épaisseur soutenue par un grillage en fer, puis faire le vide dans la cloche et supprimer ainsi une couche d'air, la distance de l'uranium à l'appareil restant constante. Dans cette expérience on ne peut recueillir à l'extérieur de la cloche que les rayons capables de traverser la plaque d'aluminium. Ceux-ci sont peu absorbés par l'air et l'expérience prouve qu'en supprimant une couche d'air de $14^{mm},5$ dans la cloche, la vitesse de la charge due à ces rayons pénétrants

augmente dans le rapport de 1 à 1,053, ce qui revient à dire que cette couche d'air de $14^{mm},5$ laisse passer 0,949 du rayonnement pénétrant.

Ainsi les rayons les plus actifs pour ioniser l'air sont les plus absorbables, et dans l'expérience décrite plus haut, avec l'air liquide ceux-ci étaient partiellement arrêtés par la couche d'air froid très dense qui avoisine le métal refroidi.

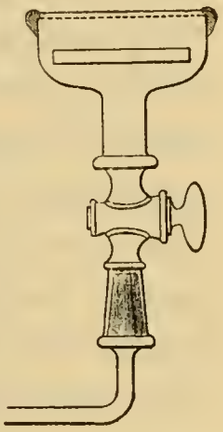


Fig. 32.

On devait donc diminuer considérablement cet effet et même le rendre insensible en n'étudiant que des rayons très pénétrants peu absorbés par l'air, mais assez absorbables cependant pour ioniser l'air de l'appareil. Pratiquement, il a suffi pour éliminer la partie la plus absorbable par l'air de recueillir le rayonnement filtré par une lame d'aluminium de $0^{mm},1$ d'épaisseur.

Les nombres observés à la température de l'air liquide ont alors été identiques à ceux qu'on obtient à la température du laboratoire.

COURANT DÛ AU RAYONNEMENT FILTRÉ
PAR UNE LAME D'ALUMINIUM DE $0^{mm},1$ D'ÉPAISSEUR.

TEMPÉRATURES.	1re SÉRIE.	2e SÉRIE.
	V	V
Température ordinaire. .	0,0336	0,0328
Température de l'air liquide..	0,0341	0,0328

On voit qu'à la température de l'ébullition de l'air

liquide, la partie du rayonnement de l'uranium filtrée au travers d'une lame d'aluminium de $0^{mm},1$ d'épaisseur reste sensiblement la même qu'à la température ordinaire.

On peut penser qu'il en est de même du rayonnement très absorbable et conclure à la constance de l'émission de l'uranium entre la température de l'air liquide et celle de l'ébullition de l'eau. En rappelant, comme je l'ai fait plus haut, que l'uranium métallique a été fondu au four électrique et a conservé sa radioactivité, on peut admettre que les hautes températures n'exercent pas d'influence permanente. M. Curie a constaté également que le chlorure de radium fondu à 800° est actif et lumineux, et qu'à la température de l'air liquide le radium continue à exciter la phosphorescence du sulfate double d'uranyle et de potassium et à émettre de la chaleur.

§ 2. — *Sur quelques actions chimiques produites par le rayonnement de l'uranium et du radium.*

Les rayons de l'uranium et les rayons secondaires qu'ils provoquent réduisent les préparations photographiques des sels d'argent. C'est une action de ce genre qui a conduit à découvrir le nouvel ordre de phénomènes que nous étudions dans ce travail. Toutes les substances radioactives produisent des actions photographiques énergiques comme on l'a vu plus haut.

Ni le rayonnement de l'uranium, ni le rayonnement considérablement plus intense du radium n'ont donné d'action nette sur l'iodure d'argent des plaques daguerriennes, ni sur certains papiers photographiques, alors que

ces plaques ou ces papiers sont sensibles à l'action de la lumière.

Dès que M. et Mme Curie eurent préparé des substances très actives, ils ne tardèrent pas à observer diverses autres actions chimiques. Le papier jaunit et se détruit sous l'action du rayonnement du radium. Le verre et la porcelaine se colorent. Le verre exempt de plomb se colore en violet par une oxydation des sels de manganèse; le verre contenant du plomb se colore en brun par une oxydation des sels de plomb. Ces colorations peuvent changer à la lumière, conformément à d'anciennes observations de Faraday et de Pelouze, sur la coloration des verres à la lumière.

Les rayons du radium transforment le platinocyanure de baryum en une variété brune moins lumineuse; ce sel transformé est régénéré partiellement par l'action de la lumière. Le même phénomène avait été observé avec les rayons de Röntgen par M. Villard.

M. Giesel a préparé un platinocyanure de baryum radifère très lumineux, qui, sous l'action de ses propres rayons, se transforme en la variété brune, en même temps que ses cristaux deviennent dichroïques.

Les composés radifères semblent s'altérer avec le temps, peut-être sous l'action de leur propre radiation. Les cristaux de chlorure de baryum radifère, blancs au moment de leur préparation, se colorent, tantôt en jaune, tantôt en rose; cette coloration disparaît par dissolution. Le chlorure dégage une odeur d'hypochlorite, le bromure dégage du brome.

M. Giesel a montré que les sels haloïdes cristallisés des

métaux alcalins (sel gemme, sylvine) se colorent sous l'influence du radium comme sous l'action des rayons cathodiques. On obtient des colorations du même genre en faisant séjourner les sels alcalins dans la vapeur du sodium. D'après M. Goldstein, le sulfate de potassium se colore en vert lorsqu'il renferme des traces de carbonate de potassium, et en violet avec des traces de chlorure de potassium; il ne se colore pas quand il est pur.

Lorsque les actions chimiques provoquées sont exothermiques, on peut se demander si le rayonnement a seulement servi d'excitant, l'énergie pouvant être empruntée à la réaction elle-même. Il n'en est plus ainsi lorsque la réaction est endothermique; l'énergie mise en jeu doit être empruntée à la source radiante. M. et Mme Curie ont observé le premier exemple d'un effet endothermique dans la formation de l'ozône dans le voisinage du radium.

M. Berthelot avait entrepris une étude de quelques réactions endothermiques pouvant fournir une mesure de l'énergie qu'elles empruntent au rayonnement. Il avait étudié les décompositions de l'acide iodique et de l'acide azotique monohydraté. Un tube contenant du chlorure de baryum radifère, placé lui-même dans un second tube, donne des effets analogues à ceux de la lumière, mais lorsqu'on intercepte, au moyen d'un écran de papier noir, la lumière donnée par la source, on n'observe plus aucune décomposition. C'était donc la lumière qui agissait dans le premier cas, et l'énergie empruntée à la source n'était utilisée qu'après sa transformation en énergie lumineuse.

L'acide oxalique en présence de l'oxygène n'a rien donné sous l'influence du rayonnement, non filtré par le

papier noir. Celui-ci dans les mêmes conditions n'a pas provoqué la transformation du soufre octaédrique soluble en soufre insoluble dans le sulfure de carbone. Peut-être la triple épaisseur de verre qui, dans ces expériences, entourait la matière active, a-t-elle absorbé les radiations efficaces.

J'ai étudié de mon côté quelques phénomènes exothermiques (1), je citerai d'abord la réduction du bichlorure de mercure en présence de l'acide oxalique. Le rayonnement du radium provoque, comme la lumière, la formation d'un précipité de calomel. L'expérience a été faite avec un petit tube de verre scellé contenant du chlorure de radium très actif, entouré d'une feuille mince d'aluminium, et placé dans un autre petit tube scellé très mince. Ce tube était plongé, à l'abri de la lumière, dans une dissolution contenant environ $6^{gr},5$ de bichlorure de mercure et $12^{gr},5$ d'acide oxalique pour 100 grammes d'eau. On peut constater le long des parois du tube radiant, une précipitation continuelle de matière qui tombe au fond, mais dont la quantité a paru assez variable avec les conditions de l'expérience. Dans une expérience pour une surface rayonnante de 24 millimètres carrés, on a obtenu en vingt-quatre heures 2 milligrammes environ de précipité.

J'ai observé également la transformation du phosphore blanc en phosphore rouge sous l'influence du rayonnement du radium. L'expérience se fait simplement en fondant un peu de phosphore blanc au fond d'un tube plein d'eau

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIII, p. 709 (4 nov. 1901).

et en plongeant dans l'eau le petit tube dont il a été question ci-dessus, de façon à atteindre la surface du phosphore. En évitant l'action de la lumière, on voit, au bout de vingt-quatre heures, une quantité très appréciable de phosphore rouge dans le voisinage du tube radiant.

Si l'on enlève la petite enveloppe d'aluminium afin de laisser agir en même temps le rayonnement lumineux du radium, l'effet n'est pas notablement différent.

Si l'on enlève alors le tube radiant, et si l'on maintient le phosphore à l'obscurité, la transformation ne se continue pas en dehors du rayonnement.

On peut analyser ce phénomène et reconnaître, au moins en partie, la nature des rayons actifs (1).

Dans une cuve plate en verre dont une face était formée par une lame de mica très mince, on a coulé du phosphore blanc, que l'on a recouvert d'une couche de glycérine. La cuve a été disposée verticalement contre l'une des armatures d'un aimant donnant un champ d'environ 523 unités CGS; puis, à la partie supérieure on a placé une source linéaire horizontale normale à la cuve et parallèle au champ. La matière active était du chlorure de radium enfermé dans un petit tube de verre mince de 1 millimètre de diamètre, et entouré d'une feuille d'aluminium battu enroulée plusieurs fois autour du tube pour arrêter la lumière émise : deux fentes successives, distantes de 15 millimètres, pratiquées dans des lames de plomb, et parallèles au tube limitaient l'émission dans un plan paral-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIV, p. 210 (27 janvier 1902).

lèle au champ magnétique. Le radium avait été enfermé dans un tube scellé et placé au-dessus du phosphore, de façon à être protégé contre toute inflammation accidentelle du phosphore pendant la longue durée de l'expérience. La présence du tube de verre arrêtait les rayons α, ainsi qu'on a pu s'en convaincre en substituant ultérieurement à la cuve de phosphore une plaque photographique.

Dans les conditions qui viennent d'être décrites on a vu au bout de quelques semaines apparaître, sur le phosphore blanc, une trace rouge montrant la transformation effectuée par la partie déviable du rayonnement, trace superposable à l'impression obtenue sur une plaque photographique de comparaison. L'expérience a été arrêtée au bout de 60 jours. Maintenue à l'obscurité la plaque de phosphore s'est conservée sans altération nouvelle, et au bout de plus d'une année l'impression est aussi visible qu'à la fin de l'expérience.

Les rayons non déviables très pénétrants dont l'impression n'apparaît sur les plaques photographiques qu'au bout de un à deux jours de pose, n'ont donné sur le phosphore aucune action appréciable. Les rayons secondaires émis par le plomb ont au contraire agi assez activement; on sait que ces rayons sont peu pénétrants et très absorbables.

Il est donc démontré par cette expérience que la partie déviable du rayonnement du radium identique aux rayons cathodiques transforme le phosphore blanc en phosphore rouge. Il est probable que les rayons α seraient également très actifs pour effectuer cette transformation, mais la

nécessité de préserver le radium contre un accident d'expérience a conduit à employer un tube de verre qui arrête ce dernier rayonnement.

§ 3. — *Conductibilité des diélectriques solides, sous l'influence du rayonnement du radium. Persistance temporaire de l'ionisation.*

Peu de temps après la découverte des rayons X, MM. Röntgen et J. J. Thomson ont étudié l'action de ces rayons sur des conducteurs électrisés noyés dans de la paraffine solide. M. Röntgen a observé un effet de décharge superficielle de l'isolant. M. J. J. Thomson a reconnu que, dans le cas de ses expériences, tout corps électrisé plongé dans un diélectrique solide ou liquide se déchargeait sous l'influence des rayons X qu'il employait. La paraffine solide a été l'objet d'expériences particulières, et l'auteur a conclu de ses observations que tous les corps, solides, liquides ou gazeux, deviennent conducteurs quand ils sont traversés par les rayons X.

A la même époque, à la suite de mes premières observations sur le rayonnement de l'uranium, j'avais reconnu comme on l'a vu plus haut, chapitre III, que les gaz rendus conducteurs par les rayons de l'uranium, conservent cette propriété pendant quelques instants après le moment où l'influence radiante a cessé d'agir.

En 1902 M. Curie a fait voir que sous l'influence des rayons du radium, les diélectriques liquides, et parmi ceux-ci, l'air liquide, deviennent conducteurs de l'électricité.

Je m'étais proposé, de mon côté, de rechercher si, sous l'influence du rayonnement du radium, la paraffine solide présente une conductibilité électrique appréciable. La question paraissait importante à élucider, car dans diverses expériences où l'on emploie la paraffine comme isolant électrique, on doit prendre en considération la conductibilité que cette matière peut acquérir quand elle est traversée par le rayonnement étudié.

J'ai constaté alors que la paraffine solide présentait une conductibilité notable quand elle était traversée par le rayonnement du radium, et j'ai reconnu en outre que la conductibilité ainsi acquise persistait pendant quelque temps après le moment où les radiations ont été supprimées.

J'ai appris depuis que des phénomènes de conductibilité résiduelle avaient été également observés par Mme Curie au cours de diverses expériences.

Voici le résumé des observations que j'ai eu l'occasion de faire sur cette question :

Le 20 février 1902, le dispositif suivant (fig. 33) avait été établi : dans un gros tube de verre vertical, de 3 centimètres de diamètre intérieur, fermé à sa partie inférieure, étaient placés deux cylindres métalliques concentriques, l'un formé d'un feuille de cuivre de 72 millimètres de hauteur, appliquée sur la paroi interne du tube, l'autre de 6 millimètres de diamètre, placé dans l'axe du tube et dépassant le bord supérieur ; ce cylindre était formé d'une feuille d'aluminium de $0^{mm},1$ d'épaisseur; à l'intérieur de ce cylindre d'aluminium était un petit tube de verre très mince étiré à la lampe, fermé à sa partie inférieure et

constituant une sorte d'entonnoir dans l'axe du système. Ce tube de verre était soutenu par le cylindre en aluminium, qui lui-même était supporté par une tige de cuivre fixée à un bloc de soufre de façon à être convenablement isolé. Le bloc de soufre était entouré de papier d'étain mis en communication avec le terre.

Le gros tube fut rempli de paraffine fondue bien pure, et on laissa le tout se solidifier.

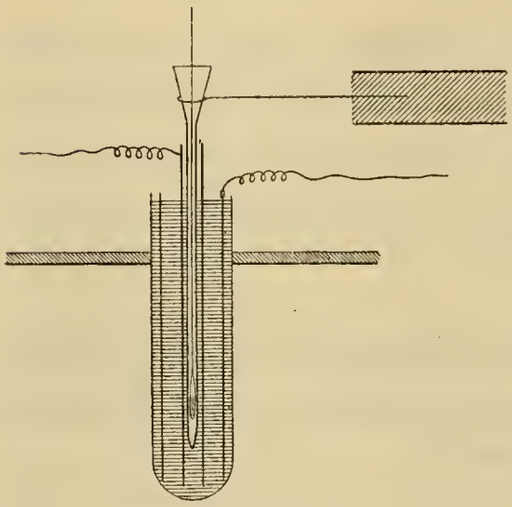


Fig. 33.

Le cylindre de cuivre extérieur pouvait être mis en communication avec une pile de 200 éléments à eau, et le cylindre d'aluminium isolé était en relation avec l'électromètre à feuille d'or.

A l'intérieur de la cavité formée par le tube mince central, on pouvait descendre, dans l'axe de la masse cylindrique de paraffine, un petit tube de verre très mince ayant 1 millimètre de diamètre et contenant une petite quantité de chlorure de radium solide très actif. La matière occupait une longueur d'environ 6 millimètres. Ce petit tube était suspendu à un fil, de sorte qu'on pouvait à volonté, soit l'enfoncer à diverses profondeurs, soit le retirer de l'appareil.

Pendant son refroidissement la paraffine devenait très conductrice chaque fois que l'on introduisait dans le cylindre central la matière active. L'effet était produit par

le rayonnement qui avait traversé les deux parois de verre des deux tubes concentriques et la paroi de $0^{mm},1$ du cylindre d'aluminium ; à ce rayonnement pénétrant il faut joindre les rayons secondaires produits à la sortie des parois de verre et d'aluminium.

Le lendemain 21 février 1902, la paraffine étant complètement refroidie, on constata qu'en portant le potentiel du cylindre de cuivre soit à 100 soit à 200 volts, l'électromètre était parfaitement isolé et la feuille d'or restait stable. Mais si l'on introduisait le radium, l'électromètre accusait un courant et la feuille d'or se déplaçait rapidement. La différence de potentiel n'était pas suffisante pour atteindre le courant de saturation avec une matière aussi active que l'était le chlorure de radium employé, et, d'autre part, une petite partie du courant pouvait provenir de l'action du radium sur l'air ambiant, action exercée soit par la partie libre très étroite du tube central, soit au travers de la paraffine, des métaux et du verre. Aussi donnerons-nous seulement à titre de renseignement les nombres observés.

Le cylindre de cuivre étant porté successivement à 200, puis à 101 volts, la vitesse avec laquelle l'électromètre se chargeait était de $0^{v},28$ par seconde dans le premier cas et de $0^{v},10$ à $0^{v},075$ environ dans le second. On enleva ensuite le radium, et la conductibilité acquise persista pendant quelque temps. Au bout d'un quart d'heure environ la vitesse de charge était encore de $0^{v},04$, le cylindre de cuivre étant au potentiel de 101 volts.

Cette expérience fut reprise le lendemain, 22 février, en notant plus exactement la durée pendant lesquelle la paraf-

fine était soumise à l'action du rayonnement, et les heures auxquelles on observait les diverses intensités de conductibilité résiduelle. L'appareil étant parfaitement isolé et au repos quand le cylindre de cuivre était à 101 volts, on introduisit le radium à 3^h12^m; aussitôt on observa une charge de $0^v,14$ environ par seconde, puis un ralentissement; la feuille d'or atteignit un maximum voisin de $3^v,6$, puis la charge se mit à baisser régulièrement. On retira alors le radium à 3^h14^m, soit au bout de 2 minutes d'action et on observa les vitesses de charge suivantes :

h. m. s.	v.
3.16.27,5	0,0357
3.22.24,5	0,0178
3.37. 1,2	0,0088

Une seconde série de mesures fut reprise immédiatement en mettant à la terre les deux cylindres de cuivre et d'aluminium, pendant que l'on faisait agir le radium. La durée de l'action fut encore de 2 minutes (3 h. 42 m., à 3 h. 44 m.). On retira le radium, on mit le cylindre de cuivre à 101 volts et on obtint alors pour la vitesse de la charge de l'électromètre

$$3^h46^m26^s,5, \qquad 0^v,0368.$$

Le cylindre de cuivre fut alors mis à la terre pendant deux minutes puis chargé de nouveau à 101 volts à 3^h49^m et on obtint

h. m. s.	v.
3.50.38	0,0256
3.57.41	0,0122
4.29. 8	0,0033

La paraffine est restée chargée, et si, après avoir mis à la terre les deux cylindres, on isole le cylindre d'aluminium et l'électromètre, celui-ci se charge en sens contraire. Ce courant peut être l'effet de la disparition progressive de la polarisation du diélectrique: il peut être dû également à une faible ionisation résiduelle qui ne se serait pas encore complètement détruite. La dissipation de la charge résiduelle se faisait avec une vitesse qui à $4^h 51^m 31^s$ était $0^v,0039$.

Le cylindre de cuivre étant toujours à la terre, on a introduit de nouveau le radium à $5^h 4^m$. Sous l'influence de la nouvelle ionisation, la charge résiduelle fournit un courant qui, mesuré six secondes après l'introduction du radium, est de $0^v,05$; au bout de $26^s,5$; le courant est moitié moindre, et quelques instants après, la charge inverse de l'électromètre est devenue extrêmement lente, indiquant que la majeure partie de la charge résiduelle de la paraffine a disparu.

Ces observations étaient relatives à une masse de paraffine qui venait d'être fondue et solidifiée. Il importait de reconnaître si la paraffine solidifiée depuis longtemps et ayant pris un état d'équilibre moléculaire stable se comportait de la même manière. Dans ce but, le dispositif décrit plus haut a été abandonné à lui-même pendant un an, en le préservant de la poussière. Au mois de décembre 1902 la partie supérieure de la couche de paraffine couverte d'un peu de poussière fut grattée, et l'appareil abandonné encore pendant deux mois. Les expériences furent reprises en mars 1903. L'appareil était alors dans des conditions excellentes d'isolement. Après une première

série d'essai, le 20 mars l'appareil manifesta un léger défaut d'isolement se traduisant, dans les conditions des expériences, par un courant de $0^{v},00348$.

Les mesures du courant qui persistait après l'action du radium, lorsque le cylindre de cuivre était au potentiel de 200 volts, sont résumées dans le tableau suivant, dans lequel on a fait figurer les deux séries de 1902. Les nombres sont corrigés de la déperdition. Les temps sont comptés à partir du moment où le radium a été retiré de l'appareil.

22 février 1902.				21 mars 1903.				26 mars 1903.	
$3^{h}14^{m}$		$3^{h}44^{m}$		$3^{h}27^{m}$ durée de l'influence : 5 minutes.		$4^{h}20$ durée de l'influence : 10 minutes.		durée de l'influence 2 minutes.	
durée de l'influence : 2 minutes.									
Heures.	Courant.	Heures.	Courant.	Heures.	Courant.	Heures.	Courant.	Heures.	Courant.
m s	v	m s	v	m s	v	m s	v	m s	v
»	»	»	»	0.12	0,0679	0.23	0,0845	»	»
»	»	»	»	»	»	0.39	0,0678	0.37,5	0,0618
»	»	»	»	1.19,4	0,0407	1.18	0,0520	1 48	0,0378
2.27,2	0,0357	2.26,5	0,0368	2.23,5	0,0336	»	»	»	»
»	»	6.38	0,0256	5. 2,5	0,0229	5.39,5	0,0286	4.25,5	0,0267
8.26,5	0,0178	»	»	8.45,5	0,0153	8.17,2	0,0235	7.51	0,0178
»	»	13.41	0,0122	»	»	12.19	0,0187	»	»
23. 1,2	0,0088	»	»	»	»	»	»	»	»
»	»	45. 8	0,0033	»	»	»	»	»	»

Les nombres obtenus à un an de distance sont tout à fait du même ordre de grandeur que ceux qui avaient été obtenus au moment où la paraffine venait d'être fondue. L'effet augmente avec la durée pendant laquelle la paraffine a été soumise à l'influence du rayonnement du radium.

On a observé également qu'après avoir introduit le radium, le potentiel qui augmentait rapidement d'abord, avec une vitesse de $0^{v},520$ par exemple, ne tardait pas à devenir constant, et se fixait à la valeur de 25 volts. Ce maximum montre que la partie du rayonnement du radium qui traverse toutes les enveloppes de l'appareil produit sur l'air entourant les conducteurs isolés une ionisation suffisante pour provoquer une déperdition; pour le potentiel de 25 volts cette déperdition compense le courant produit par l'ionisation de la paraffine entre le cylindre central et le cylindre de cuivre au potentiel de 200 volts. Si le potentiel de ce cylindre est moindre, le courant est également moindre, car ces potentiels sont inférieurs à ceux qui sont nécessaires pour obtenir le courant de saturation avec des matières très actives. Dans ce cas la déperdition provoquée à l'extérieur par le rayonnement du radium compense le courant pour un potentiel bien moindre ainsi que cela avait été observé dans les premières expériences.

Cette perturbation s'oppose à une mesure du courant de charge pendant que le radium est à l'intérieur de l'appareil; il eût fallu, en outre, comme il vient d'être dit plus haut, porter le potentiel du cylindre de cuivre à une valeur plus élevée pour créer un champ électrique capable d'atteindre le courant de saturation.

Lorsque le radium est retiré de l'appareil, la perturbation n'existe plus et le champ électrique est suffisant pour atteindre la saturation avec la faible ionisation persistante. L'expérience prouve que le courant est le même lorsque le cylindre extérieur est, soit à 100 volts, soit à 200 volts. Pour éviter toute action sur l'air ambiant, le

radium, dès qu'il était retiré de l'appareil, était transporté dans une autre pièce du laboratoire.

Les courbes qui représentent les nombres ci-dessus ont l'allure de branches d'hyperboles.

On sait que les lois théoriques et expérimentales de la mesure de la vitesse de recombinaison des ions gazeux conduisent à des formules représentées par des branches d'hyperboles. Les nombres du tableau précédent ne sont pas assez précis pour que l'on puisse en déduire des conséquences théoriques relatives aux propriétés de la paraffine ionisée. On peut cependant les considérer comme mettant nettement en évidence la conductibilité acquise par la paraffine sous l'influence du rayonnement pénétrant du radium. On devra tenir compte de cette conductibilité dans les expériences où la paraffine, employée comme isolant, est traversée par le rayonnement étudié.

L'analogie de ce phénomène avec celui que manifestent tous les diélectriques traversés par les rayons X, conduit à penser que le rayonnement du radium produit des effets du même ordre au travers de tous les diélectriques solides, comme au travers des diélectriques liquides et gazeux.

§ 4. — *Action physiologique du rayonnement du radium sur la peau et sur les graines.*

Les rayons du radium agissent énergiquement sur la peau. Les opérateurs qui manient les produits actifs ont éprouvé sur les mains diverses actions. Les mains ont une tendance générale à la desquamation. Les extrémités des doigts qui ont tenu les tubes ou capsules renfermant les

produits actifs deviennent dures, blanches et parfois très douloureuses. J'ai éprouvé ainsi une inflammation des extrémités des doigts des deux mains qui a duré une quinzaine de jours et s'est terminée par la chute de la peau; la sensibilité douloureuse a persisté pendant plus de deux mois.

En dehors de ces effets, on a observé des brûlures plus sérieuses. Les premières observations de ce genre ont été faites par M. Walkoff (1), et par M. Giesel (2). M. Curie a expérimenté sur lui-même (3) cette action destructive de la peau et Mme Curie a eu également à en subir les effets.

Je rapporterai ici seulement l'observation qui m'est personnelle. M. Curie avait mis à ma disposition, en vue d'une conférence, quelques décigrammes de chlorure de baryum radifère très actif (activité 800 000 fois celle de l'uranium dans l'appareil de M. Curie). La matière était enfermée dans un tube de verre scellé et occupait un volume cylindrique ayant environ 10 à 15 millimètres de hauteur sur 3 millimètres de diamètre. Le tube enveloppé de papier était contenu dans une petite boîte de carton. Le 3 et le 4 avril 1901, cette boîte a été placée à plusieurs reprises dans un coin d'une poche de gilet du côté droit pendant une durée totale qui peut être évaluée à six heures. Le rayonnement était assez intense pour exciter vivement, au travers de la boîte de carton et des vêtements, la

(1) Walkoff. Photogr. Rundschau, oct. 1900.

(2) Giesel. Berichte der Deutsch chemischen Gesellschaft, t. XXXIII, p. 3569.

(3) H. Becquerel et P. Curie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXII, p. 1289 (3 juin 1901).

phosphorescence d'un écran de platinocyanure de baryum appliqué à l'extérieur contre un paletot, et même pour provoquer au travers du corps une très légère phosphorescence de cet écran.

Le 13 avril, sans avoir ressenti aucune douleur, je m'aperçus que le rayonnement au travers du tube de verre, de la boîte et des vêtements avait produit sur la peau une tache rouge; celle-ci devint plus foncée les jours suivants, marquant en rouge la forme oblongue du tube et affectant une forme ovale de 6 centimètres de long sur 4 centimètres de large. Le 24 avril, la peau tombait, puis la partie la plus attaquée se creusa en se mettant à suppurer. La plaie fut soignée pendant un mois avec du liniment oléo-calcaire comme une brûlure ordinaire; les tissus mortifiés furent éliminés, et le 22 mai, c'est-à-dire quarante-neuf jours après l'action des rayons, la plaie se ferma laissant une cicatrice dans la région qui marquait la place du tube; dans toute la région attaquée la peau a subi une altération complète, qui, au bout de deux ans, est encore très marquée, figurant une partie plus blanche parsemée de marbrures rouges.

Pendant qu'on donnait des soins à cette brûlure on vit apparaître, le 15 mai, une seconde tache rouge oblongue en regard de l'autre coin de la poche de gilet où avait été placée la matière active. L'action remontait soit à la même date que plus haut, soit vraisemblablement au 11 avril, mais elle avait été de courte durée, une heure au plus. L'érythème apparaissait donc trente-quatre jours au moins après l'action excitatrice; l'inflammation se développa présentant l'aspect d'une brûlure très superfi-

cielle. Le 26 mai, la peau commençait à tomber; soignée comme la première, cette brûlure guérit rapidement en ne laissant sur la peau qu'une coloration brune et quelques filets rouges qui persistent encore au bout de deux ans.

Dans l'intervalle de ces observations, les 10, 11 et 12 avril, à l'occasion d'une conférence faite à Rotterdam, la même matière active, enfermée dans un tube de plomb dont les parois avaient environ 5 millimètres d'épaisseur, et placée dans une poche de gilet, de l'autre côté, n'a paru produire aucune action.

L'année suivante, entre le 5 mars et le 14 mars, j'ai transporté à Londres, Cambridge et Manchester, dans un tube en plomb dont les parois avaient 5 millimètres d'épaisseur, un tube de verre scellé contenant, comme précédemment, quelques décigrammes de chlorure de radium extrêmement actif, en ayant soin de ne pas conserver le tube sur moi lorsque cela n'était pas nécessaire. Ce tube avait été placé dans une poche de gilet du côté gauche. Le temps total pendant lequel le tube a séjourné dans la poche peut être évalué à une quarantaine d'heures. Il n'y a pas eu de brûlure, mais quelques semaines plus tard on a constaté une légère coloration brune de la peau sur une assez large étendue, coloration qui n'a pas entièrement disparu au bout d'une année.

Il est peu probable que cette action soit due aux rayons très pénétrants filtrés par le plomb. Il semble plutôt qu'elle ait été produite par les rayons secondaires émis par le plomb. On aurait arrêté ces derniers en mettant le tube de plomb dans un tube en verre.

Il est à remarquer que, dans la brûlure profonde qui a

été décrite plus haut, la peau seule a été attaquée dans toute son épaisseur; les muscles et les organes sous-jacents n'ont pas été atteints.

Dans un récent travail (1), M. Danysz a constaté des résultats analogues; au bout de 24 heures l'action d'un tube de verre contenant un produit très actif placé sur la peau d'un animal provoque une destruction complète de l'épiderme et du derme. En maintenant le tube pendant 48 heures ou même plus longtemps, il ne se produit pas de plaie plus profonde. Les tissus conjonctif et musculaire sous-jacents ne sont pas atteints. Les rayons pathogènes sont absorbés par la peau, et les autres tissus sont moins sensibles. En plaçant le tube actif sous la peau on n'obtient qu'une réaction relativement très faible dans l'épiderme, et aucun effet sur les tissus conjonctif et musculaire environnants. Les intestins et les muqueuses sont très peu sensibles.

Au contraire, le système nerveux est beaucoup plus sensible que l'épiderme; l'action du rayonnement amène rapidement des lésions qui provoquent la paralysie et la mort des animaux. Les centres nerveux sont efficacement protégés par la boîte cranienne, c'est-à-dire par le tissu osseux, tandis que le tissu cartilagineux des jeunes sujets ne s'oppose pas à l'action du rayonnement. On doit en conclure que les rayons pénétrants sont peu actifs, et que les effets sont produits par les rayons très absorbables.

Je rappellerai encore les recherches de MM. Aschkinass et Caspari relatives à l'action du rayonnement nouveau

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 461 (16 février 1903).

sur les bactéries (1). Certaines espèces sont arrêtées dans leur développement; les rayons les plus absorbables sont les plus actifs; une épaisseur d'aluminium de $0^{mm},001$ suffit pour diminuer nettement leur action sur une culture. M. Danysz est arrivé à la même conclusion. Toutes les espèces sont arrêtées dans leur développement et quelques-unes comme le charbon peuvent être tuées dans certaines conditions. Des larves d'insectes peuvent également être détruites, et il semble que dans ce cas ce soit le système nerveux qui soit le plus atteint.

Je mentionnerai aussi des expériences faites à mon laboratoire par M. Matout (2), sur la germination de graines exposées au rayonnement du radium avant d'être plantées. Les expériences ont porté sur des graines de cresson alénois et de moutarde blanche. Des graines en nombre égal étaient disposées sur une seule couche au fond de deux petits cylindres de papier fermés par une mince feuille de papier. L'un des cylindres était exposé au rayonnement du radium, l'autre servait de témoin.

Une exposition de 24 heures n'a pas sensiblement modifié les graines; mais en prolongeant l'exposition pendant une semaine ou même davantage, on a obtenu ce résultat qu'aucune des graines exposées au rayonnement du radium et plantées ultérieurement n'a germé, tandis que les autres ont germé en moyenne dans la proportion de huit sur dix.

Le rayonnement du radium a donc altéré la graine au point de détruire la faculté de germer.

---

(1) *Arch. für die Ges. Physiol. Bd.* 86, 1901.

(2) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIII, p. 712.

§ 5. — *Spinthariscope de Sir W. Crookes.*

Sir W. Crookes a disposé récemment (1) une très curieuse expérience. Un grain d'un sel de radium est fixé à l'extrémité d'un fil métallique, à un demi-millimètre environ d'un écran de sulfure de zinc phosphorescent; en regardant l'écran avec une loupe, l'œil aperçoit sur l'écran une véritable pluie de points lumineux, qui apparaissent et disparaissent continuellement donnant à l'écran l'aspect d'un ciel étoilé. Les points brillants sont plus rapprochés dans les régions qui sont les plus voisines du grain de radium, près duquel la lueur paraît continue. Le phénomène n'est pas altéré par un courant d'air, et se produit dans le vide; il disparaît si, entre la source et la matière phosphorescente, on interpose un écran, même très mince.

Ce fait a conduit Sir W. Crookes à penser que l'effet était produit par les rayons α, et que chacun des points lumineux était le résultat du choc d'un électron isolé.

Dans cette manière de voir, l'appareil, auquel Sir W. Crookes a donné le nom de *Spinthariscope*, révélerait une discontinuité dans l'émission des rayons α, et l'action individuelle d'un électron. Cependant cette conclusion ne peut encore être acceptée sans réserves, car MM. Elster et Geitel (2), après avoir répété l'expérience avec la blende hexagonale, n'ont pas revu le phénomène avec une autre matière phophorescente.

---

(1) *Proc. Roy. Soc.*, t. LXXI, p. 405 (19 mars 1903). *Electrician* (3 avril 1903).
(2) *Physikalische Zeitschrift*, IV, p. 439 (27 mars 1903).

CHAPITRE VIII

ÉMANATION

§ 1. — *Émanation dans l'air et dans les espaces fermés.*

Dans les chapitres précédents, on n'a traité que du rayonnement des corps radioactifs, c'est-à-dire d'un mode particulier d'énergie, qui, en dehors d'un champ magnétique ou électrique, se transmet rectilignement dans l'espace et traverse les corps solides, le verre ou le mica, les métaux ou d'autres corps opaques pour la lumière ordinaire.

A côté de ce phénomène, il en est un autre non moins important, qui paraît intimement lié à la radioactivité, s'il n'en est pas le phénomène primordial. Le thorium et le radium émettent de l'énergie sous une forme particulière; l'activité qui en résulte se propage à la manière d'une vapeur active, ou d'une sorte d'*émanation* arrêtée par toute enveloppe qui arrête les gaz, quelque mince que soit cette enveloppe. Cette émanation se fixe sur les corps pour disparaître ensuite, rendant ceux-ci temporairement radioactifs quand ils ne sont plus sous l'influence

de la source active ; l'activité disparaît même lorsque les corps activés sont maintenus dans une enceinte fermée. Il n'est pas démontré que le gaz ne serve pas seulement de support à la forme particulière d'énergie qui constitue l'émanation.

Ces deux propriétés fondamentales ont été découvertes simultanément par M. et Mme Curie et par M. Rutherford.

Par ordre de date, la première publication a été faite par M. et Mme Curie le 6 novembre 1899 (1). Les auteurs ont montré que tous les corps solides exposés devant un sel de radium deviennent temporairement radioactifs. Cette radioactivité *induite* augmente avec le temps de l'exposition jusqu'à une limite qui est la même pour tous les corps activés dans les mêmes conditions. Ceux-ci, éloignés de la source, à l'air libre, perdent leur activité, rapidement d'abord, puis ensuite, suivant une loi asymptotique.

Peu de temps après cette publication, parut, dans le fascicule du 1er janvier 1900 du *Philosophical Magazine* (2), un mémoire de M. Rutherford, daté de Montreal, septembre 1899, et intitulé : « *Sur une Substance radioactive émise par les composés du thorium.* »

L'auteur se reporte d'abord à l'observation de M. Schmidt sur l'activité du thorium, puis à un travail de M. Owens (3) qui, après avoir reconnu l'existence de deux types de radiations, les unes absorbables, les autres

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIX, p. 714.
(2) *Phil. Mag.*, t. 49, p. 1.
(3) *Phil. Mag.*, t. 48, p. 360 (Radiation du thorium).

pénétrantes, avait observé qu'un courant d'air pouvait réduire l'activité du thorium à 0,33 de la valeur qu'elle possède dans l'air calme. (Je rappellerai à cette occasion que, deux ans auparavant, j'avais obtenu, comme on l'a vu plus haut, une réduction identique, 0,327, en entraînant l'air ionisé par l'uranium, et que, plus tard, Mme Curie, en retrouvant l'activité du thorium, avait signalé la grande irrégularité des observations faites avec ce corps à l'air libre.)

M. Rutherford explique cette variabilité par l'existence d'une *émanation* entraînée par l'air, se comportant comme un gaz actif, traversant les substances poreuses, des feuilles minces de métal battu, barbotant, sans perdre son activité, dans l'eau à diverses températures, dans l'acide sulfurique étendu ou concentré, mais ne traversant pas une feuille de mica de $0^{mm},06$ d'épaisseur.

Cette émanation diffère d'un gaz en ce qu'elle est indépendante de la pression, et qu'elle ne donne pas de tension appréciable dans le vide. Elle ne donne pas non plus de spectre caractéristique avec l'étincelle électrique.

A la fin de ce premier mémoire, M. Rutherford annonce qu'il a observé que les corps qui reçoivent l'émanation deviennent eux-mêmes actifs.

Ainsi les auteurs arrivent chacun avec une découverte : M. et Mme Curie découvrent la radioactivité induite et voient de suite que le phénomène est temporaire et indépendant de la nature du corps activé ; M. Rutherford découvre l'émanation qu'il ne va pas tarder à caractériser comme la cause de la radioactivité induite.

En effet, au moment où M. et Mme Curie publiaient leurs premières observations, M. Rutherford complétait

son premier travail par des observations très intéressantes, exposées dans un second mémoire assez étendu daté du 22 novembre 1899 et publié dans le fascicule de février 1900 du *Philosophical Magazine* (1), sous le titre « *Radioactivité produite par l'action des composés du thorium* ». C'est l'étude d'un phénomène produit par le thorium, identique à celui que M. et Mme Curie avaient observé avec le radium; mais M. Rutherford trouve un phénomène nouveau, c'est que l'émanation se fixe sur les corps électrisés négativement, et que l'on peut par ce moyen concentrer sur un fil la radioactivité induite. Voici, du reste, les conclusions du Mémoire de M. Rutherford :

Tous les composés du thorium qui ont été examinés produisent la radioactivité. Lorsque les conducteurs sont chargés, c'est le conducteur négatif qui devient radioactif. On peut concentrer ainsi l'action sur un fil fin. L'oxyde est le plus actif des composés du thorium; il perd son pouvoir s'il est chauffé pendant plusieurs heures à une température élevée.

Le pouvoir inducteur est lié à une « *émanation* ». La radiation excitée est homogène et plus pénétrante que celle du thorium et de l'uranium. Elle est confinée à la surface, indépendante de la substance activée et de la nature de la surface. L'activité décroît suivant une progression géométrique et diminue de moitié en onze heures environ.

L'induction croît pendant l'excitation d'abord proportionnellement au temps, puis plus lentement jusqu'à un

(1) *Phil. Mag.*, fév. 1900.

maximum. L'activité produite au bout d'un temps donné d'exposition varie avec la différence de potentiel et devient constante pour une grande force électro-motrice.

Elle est indépendante de la pression, excepté pour de basses pressions, et varie peu dans l'air, l'hydrogène ou l'acide carbonique.

On n'observe pas d'augmentation de poids du corps activé. La chaleur, l'acide nitrique froid ou chaud, l'eau n'enlèvent pas toute la radioactivité. L'acide chlorhydrique ou sulfurique la fait disparaître. Le résidu de la solution évaporée est actif.

M. Rutherford en conclut que l'émanation est de la matière qui se fixe sur les corps, et que cette matière est chargée positivement par son passage dans l'air. Une plaque activée n'a pu exciter la radioactivité sur une autre plaque approchée de la première.

Nous ne discuterons pas encore l'exactitude de ces diverses conclusions; celles-ci ont été rapportées pour montrer à quel point les savants français et anglais avaient amené la question.

Les recherches sur ce phénomène subirent une courte interruption. On verra plus loin l'exposé d'autres expériences qui peuvent être rattachées au même odre de phénomènes. A cette époque, l'action, nouvellement découverte, d'un champ magnétique sur le rayonnement attira momentanément l'attention sur d'autres points qui ont été traités plus haut. Pendant que je m'attachais presque exclusivement à l'analyse magnétique du rayonnement, M. Curie, après avoir réalisé la belle expérience par laquelle il démontra la charge négative des rayons dé-

viables β, reprit le premier l'étude de la radioactivité induite dans la voie qu'il avait ouverte.

Dans une première note (1), MM. P. Curie et Debierne, après avoir rappelé les observations de MM. Owens et Rutherford sur le thorium, ainsi qu'une reproduction de ces expériences par M. Dorn, à Halle, appellent de nouveau l'attention sur le fait que tout au début de leurs recherches M. et Mme Curie avaient préparé un gaz radioactif, qui, dans un tube scellé, conserva son activité pendant un mois, puis celle-ci disparut. Ils montrent ensuite que si l'on opère en vase clos la radioactivité induite est beaucoup plus intense qu'à l'air libre, et qu'elle peut atteindre 8000 fois celle de l'uranium. Le rayonnement n'intervient pas dans le phénomène de l'activation; dans une même enceinte les corps s'activent à l'abri du rayonnement. Si, dans l'enceinte, la matière active est elle-même enfermée dans une ampoule scellée, les corps ne s'activent pas. Il est nécessaire qu'il y ait entre la source et les corps qui s'activent une communication continue par des gaz; la transmission peut se faire par des tubes capillaires très longs.

Les corps activés perdent leur activité en un jour à l'air libre, et plus lentement dans une enceinte fermée.

Les sels de polonium n'ont pas communiqué de radioactivité induite.

Les auteurs insistent sur l'importance du rôle que ce

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXII, p. 548 (4 mars 1901).

phénomène paraît jouer dans la manifestation de la radioactivité.

Peu après (1), ils précisent le rôle des gaz qui semblent servir seulement de support à la cause qui produit la radioactivité induite. Dans une enceinte fermée contenant un sel de radium, les corps solides prennent tous une activité limite qui est la même, quelle que soit la matière activée, quels que soient les gaz et leur pression, la même encore si le vide a été fait dans l'enceinte. Cependant l'activité induite disparaît, ou ne se produit pas, si l'on entretient constamment le vide avec une pompe à mercure en enlevant les gaz au fur et à mesure qu'ils se dégagent des matières enfermées dans l'enceinte.

Les gaz occlus dans les préparations radioactives de radium, et extraits avec la pompe en les chauffant dans le vide, sont fortement radioactifs, et rayonnent à travers le verre. Les gaz ainsi activés rendent le verre lumineux, et le noircissent à la longue. Dans un tube scellé, leur activité disparaît très lentement.

L'eau extraite par le même procédé du chlorure de baryum radifère hydraté est radioactive; elle perd sa radioactivité à l'air, et la conserve plus longtemps dans un tube scellé. On peut obtenir de l'eau radioactive par trois procédés (2) : 1° en extrayant l'eau contenue dans les sels actifs; 2° en plaçant de l'eau et un sel de radium, solide ou dissous, dans une même enceinte fermée et dans

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXII, p. 768 (25 mars 1901).

(2) *Ibid.*, t. CXXXIII, p. 276 (29 juillet 1901).

deux vases séparés; 3° en plongeant dans l'eau une ampoule fermée en celluloïd contenant une solution d'un sel de radium. Le celluloïd se comporte comme une membrane semi perméable; il ne passe dans l'eau extérieure aucune trace du sel de radium, et seule la cause de l'activation de l'eau se diffuse à travers la membrane.

Dans l'air, les dissolutions des sels de radium subissent une diminution observée déjà par M. Giesel(1), mais elles reprennent leur activité si on les enferme ensuite dans des tubes scellés. Les sels à l'état solide ne perdent pas dans l'air une partie de leur activité comme les dissolutions. Les auteurs concluent de ces faits qu'il y a deux modes de dissipation de l'énergie, par rayonnement et par conduction, et que, dans les diverses conditions, il s'établit un régime entre ces deux modes de dissipation de l'énergie et l'apport d'énergie fourni par le phénomène atomique qui est la cause de la radioactivité.

Avec les dissolutions la perte par conduction est considérable et les effets induits sont beaucoup plus intenses, (20 à 40 fois par exemple). Les sels recueillis des dissolutions sont d'autant moins actifs que celles-ci ont été plus longtemps exposées à l'air, mais les sels solides reprennent tous peu à peu leur activité primitive. Dans ceux-ci l'énergie radioactive se dissipe surtout par rayonnement.

Un sel radifère qui a été dissous et vient d'être séché possède le même pouvoir pour provoquer l'activité induite, qu'un échantillon qui, après avoir été préparé à l'état solide, est resté dans cet état un temps suffisant

(1) Giesel, *Ann. der Physik und Chemie*, t. LXIX, p. 91, 1899.

pour atteindre la radioactivité limite; l'activité des deux produits peut cependant être très différente.

Quand on chauffe un composé radifère, ce composé dégage de l'émanation et perd de l'activité. Ce fait a été observé par M. Rutheford et par M. et Mme Curie. La diminution d'activité ne persiste pas, et l'activité se régénère spontanément. Mme Curie a reconnu que l'activité limite atteinte par cette régénération est plus élevée que l'activité du sel avant la chauffe, du moins pour le chlorure. L'effet de la chauffe ne persiste pas quand on dissout la substance radifère chauffée.

MM. Curie et Debierne (1) ont encore montré que la radioactivité induite dans une enceinte fermée, indépendante de la nature du gaz, de sa pression, et de la nature des corps solides activés, variait cependant avec l'espace gazeux existant devant ces corps, et semblait proportionnelle à cet espace. Ils ont également reconnu que le rayonnement des corps activés par le radium contenait, comme le rayonnement du radium, des rayons déviables, et des rayons non déviables par un champ magnétique.

Signalons encore une expérience brillante qui consiste à placer dans deux ballons séparés, réunis par un tube scellé, d'un côté une solution d'un sel de radium et de l'autre une couche de sulfure de zinc phosphorescent. Celui-ci ne tarde pas à s'induire, et, sous l'influence de sa propre radioactivité, il devient très lumineux. Il resterait ainsi indéfiniment lumineux s'il ne subissait pas une dé-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIII, p. 931 (2 décembre 1901).

composition chimique qui, au bout de quelques jours, fait disparaître la phosphorescence.

Enfin, par une série de mesures publiées récemment (1), M. Curie a complété les faits que nous venons de résumer.

Il y a deux phénomènes distincts à considérer dans la dissipation de l'activité des corps activés: d'une part, la déperdition de l'activité des gaz actifs qui transmettent la radioactivité induite ou servent de support à l'émanation, activité qui diminue de moitié en quatre jours, et, d'autre part, la déperdition de l'activité des corps solides activés dans une enceinte fermée, et transportés à l'air libre; leur activité diminue de moitié en vingt-huit minutes.

Pour étudier le premier phénomène on dispose une enceinte de verre, tube ou ballon, en communication par un tube de verre avec un flacon contenant un sel de radium; au bout d'un temps variable on sépare l'enceinte du flacon en fermant à la lampe le tube de communication, et l'on étudie le rayonnement des parois. Celui-ci tombe de moitié en quatre jours. Dans ce cas, c'est l'air radioactif intérieur qui entretient l'activité des parois, car si l'on ouvre l'enceinte activée et si l'on chasse l'air qu'elle contient, les parois de l'enceinte se désactivent à partir de ce moment suivant la loi plus rapide commune aux solides placés à l'air libre.

La loi de désactivation des gaz actifs renfermés dans une enceinte close est représentée par la formule $I = I_0 e^{-\frac{t}{\theta}}$ dans laquelle le temps $\theta = 4{,}97\ 10^5$ secondes.

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXV, p. 857 (17 nov. 1902), t. CXXXVI, p. 223 (26 février 1903) et p. 364 (9 fév. 1903).

Ce temps θ est le même si l'on emploie, pour l'activation, du chlorure de radium solide ou des solutions d'un sel de radium, quelles que soient leur activité, les dimensions et les formes des enceintes activées, les épaisseurs ou la nature des parois (verre, cuivre, aluminium); il est indépendant des dimensions des tubes qui ont servi à conduire l'activation, du temps de cette activation, de la pression et de la nature des gaz activés (air, hydrogène, acide carbonique), et de la température qui a varié entre celle de l'air liquide et $+400^{\circ}$.

Cette constante de temps qui correspond à une diminution de moitié, de 4 jours, est une constante caractéristique de la forme particulière sous laquelle l'énergie est emmagasinée dans les gaz actifs.

La loi de désactivation des corps retirés de l'enceinte activante et transportés à l'air libre est un peu plus complexe. Elle est la même quelle que soit la durée du séjour dans l'enceinte, si cette durée dépasse vingt-quatre heures. En général, la nature des corps n'intervient pas. La formule qui exprime l'intensité du rayonnement à un instant quelconque est alors

$$I = I_0\left[a\,e^{-\frac{t}{\theta_1}} - (a-1)e^{-\frac{t}{\theta_2}}\right],$$

avec

$$\theta_1 = 2400 \text{ sec.}, \quad \theta_2 = 1860 \text{ sec.}, \quad \text{et} \quad a = 4{,}20.$$

Au bout de quelques heures, le terme en θ_1 est prépondérant, et M. Curie considère cette constante θ_1, comme caractéristique de la forme sous laquelle l'énergie est emmagasinée à la surface des corps solides. La constante θ_1, cor-

respond à une diminution de moitié en vingt-huit minutes.

Lorsque la durée de l'activation est inférieure à vingt-quatre heures les courbes qui représentent les logarithmes des intensités en fonction du temps, manifestent des variations pendant les premières heures de la désactivation, présentant une chute brusque, un minimum, puis un maximum, et enfin une loi régulière commune. La grandeur de ces variations du début change avec la durée de l'activation, et est surtout notable si l'activation n'a duré que quelques secondes ou quelques minutes.

Les corps activés retirés de l'enceinte activante ont la propriété d'émettre eux-mêmes, pendant quelque temps, une émanation capable d'activer d'autres corps placés dans leur voisinage. Cette propriété étudiée avec des lames métalliques activées se perd assez rapidement et ne se manifeste plus au bout d'une ou deux heures, alors que les lames sont encore fortement radioactives. M. Curie fait observer qu'il faut peut-être rechercher, dans la présence et la transformation d'une certaine quantité d'émanation, la cause des singularités des courbes au début de la désactivation.

La loi d'activation d'un corps solide est la même que celle de la désactivation.

La désactivation ne dépend pas en général des corps activés ; cependant, pour certains corps qui ont subi une activation longue, la loi exponentielle finale ne s'applique plus. Le phénomène est manifeste avec le celluloïd et le caoutchouc ; il est faible avec la paraffine et la cire, et se fait sentir avec l'alun et le plomb. L'intensité décroît moins vite que ne l'indique la loi ci-dessus. Le cellu-

loïd a, de plus, la propriété d'émettre de l'émanation pendant plusieurs jours avant de se désactiver complètement.

Enfin M. Curie a montré récemment (1) que l'émanation se diffuse dans l'air avec la même vitesse qu'un gaz dans un autre gaz. Si l'on met en communication deux réservoirs contenant, l'un de l'air actif, l'autre de l'air inactif, l'émanation se diffuse et se partage entre les deux réservoirs proportionnellement à leurs volumes. Si l'un des réservoirs est échauffé ou réfroidi, l'émanation se partage entre les réservoirs dans les mêmes proportions que les gaz dans les mêmes conditions.

Ces résultats remarquables sont, comme on le voit, établis avec la plus grande netteté, indépendamment de toute théorie.

De son côté, M. Rutherford reprit en 1902 l'étude de la radioactivité. Dans la série des mémoires qui parurent à de courts intervalles (2), les premiers montrent que l'auteur n'est pas au courant des recherches récentes et en particulier de celles de M. Curie; mais dans les mémoires suivants cette lacune est comblée, et plusieurs conclusions erronées sont rectifiées. La plus grande partie des expériences est relative à l'émanation et à la radiation du thorium, ainsi qu'à des phénomènes dont nous parlerons plus loin, et à l'occasion desquels nous analyserons ce travail. On doit seulement mentionner ici : 1° l'observation

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 1314 (2 juin 1903).

(2) *Rutherford et Miss. H. T. Brooks. Phil. Mag.*, 6e série, t. IV, p. 1 (juin 1902), cl. *Rutherford et E. Grier*, *ibid.*, p. 315 (sept. 1902).

des irrégularités du début dans la déperdition de la radioactivité induite par le radium, surtout si l'activation a été de courte durée; 2° la constatation que, dans le cas particulier de ces expériences, la pénétrabilité des radiations excitées, soit par le thorium, soit par le radium, était la même, et plus grande que celle du rayonnement (déviable total) des matières qui avaient produit l'activité induite; 3° le fait que les corps excités par l'émanation du thorium émettent eux-mêmes une émanation en plus des rayons déviables et non déviables. Une très longue étude (1) sur la cause et la nature de la radioactivité, et relative surtout au thorium, sera analysée plus loin; nous citerons encore un travail (2) sur la radioactivité « excitée » (induite) et son mode de transmission, dont les idées théoriques, qui seront discutées ci-après, ont eu le mérite de faire prévoir à l'auteur que les rayons α, réputés non déviables, devaient être chargés positivement et être analogues aux Kanalstrahlen de M. Goldstein. La démonstration expérimentale de ce fait par M. Rutherford, ainsi que mes expériences sur ce point, ont été développées plus haut (p. 186).

On ne peut terminer ce résumé sans citer un travail très important de MM. Elster et Geitel (3), sur la radioactivité induite par l'air atmosphérique.

Après avoir constaté l'existence d'une conductibilité normale de l'air atmosphérique, les auteurs, s'inspirant d'une expérience de M. Rutherford, ont constaté qu'un

(1) *Rutherford et F. Soddy, Phil. Mag.*, 6e série, t. IV, p. 370 et 569 (sept., nov. 1902).

(2) *Phil. Mag.*, 6e série, t. V, p. 95 (janv. 1903).

(3) *Physikalische Zeitschrift*, t. II, p. 390, 1901; — t. III, p. 76, 1901.

fil de cuivre tendu à l'air libre, et maintenu pendant plusieurs heures à un potentiel négatif élevé, devient superficiellement radioactif. On recueille cette activité en frottant la surface du fil avec un petit morceau de peau ou de papier imbibé d'ammoniaque ou d'une solution qui attaque le métal, et dissout la couche superficielle. Ces morceaux deviennent radioactifs; en les brûlant on peut concentrer l'activité sous un petit volume dans le résidu de cendres.

Les lois de l'activation dans ces conditions semblent conformes à celles de l'activité induite; les grandes masses d'air et surtout les masses d'air des enceintes fermées sont fortement conductrices et provoquent une activité plus forte que l'air libre. L'air des caves et des grottes fermées depuis quelque temps est particulièrement actif.

Cette activation spontanée des grandes masses d'air enfermées, à l'abri de tout corps radioactif, rapproche ce phénomène de celui de l'induction par l'émanation; les auteurs ont reconnu plus tard (1) que l'air extrait du sol était radioactif et doué des propriétés de l'émanation du thorium et du radium. L'existence d'une émanation provenant du sol terrestre explique les phénomènes observés par MM. Elster et Geitel dans leur remarquable travail.

Je n'ai pas contribué personnellement à l'observation des faits particuliers qui viennent d'être exposés dans ce paragraphe. Il m'a paru cependant nécessaire de les résumer ici, parce qu'ils constituent l'un des phénomènes fondamentaux de la radioactivité et se lient intimement à ceux dont l'étude fait l'objet de ce mémoire.

---

(1) *Physikalische Zeitschrift*, t. III, p. 583 (sept. 1902).

§ 2. — *Activation de diverses substances précipitées dans les dissolutions de sels radioactifs.*

Nous venons de voir que l'activité induite se transmet par l'intermédiaire des gaz : il existe un mode d'activation beaucoup plus énergique qui consiste à mettre les corps en contact intime à l'état de dissolution.

Dès le début de leurs recherches, M. et Mme Curie reconnurent que les substances inactives que l'on introduit dans une dissolution renfermant un sel de radium très actif prennent une forte radioactivité induite, et la conservent pendant quelque temps après avoir été séparées du radium. Ce fait a été observé également par M. Giesel (1) qui a ainsi activé du bismuth. La difficulté de ces expériences consiste dans les soins extrêmes qu'il faut prendre pour éliminer le radium.

Dans ses recherches sur l'actinium (2), M. Debierne a reconnu des effets du même ordre, et, en particulier, il a activé des sels de baryum en les maintenant en dissolution avec des sels d'actinium.

A la même époque, M. Bela v. Lengyel (3), ayant préparé un mélange de nitrate d'urane et de nitrate de baryum fondus à la haute température de l'arc électrique, en retira un baryum actif, et M. Giesel fit voir que l'uranium ainsi traité diminuait d'activité.

---

(1) *Soc. de Phys.*, de Berlin (janvier 1900).

(2) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 906 (2 avril 1900) et t. CXXXI, p. 333 (30 juillet 1900).

(3) *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*, n° 8, p. 1237 (mai 1900).

En même temps, Sir W. Crookes (1) publiait une étude sur la radioactivité de l'uranium, l'affaiblissement des sels d'urane et la préparation d'une matière active; nous y reviendrons ci-après.

Ces diverses expériences pouvaient faire douter de la radioactivité propre de l'uranium, et l'on pouvait supposer que les traitements divers dont il a été question entraînaient des traces d'une matière très active, à laquelle les corps auraient dû leur radioactivité. Un tel entraînement existe en fait dans la précipitation du sulfate de baryum au sein d'une solution d'un sel d'actinium.

De mon côté (2), en mélangeant des solutions de chlorure d'uranyle et de chlorure de baryum, et en précipitant la baryte à l'état de sulfate, j'obtins divers précipités actifs et des sels d'urane affaiblis; mais avant d'exposer ce travail, ainsi que celui de Sir W. Crookes, nous donnerons quelques détails sur les résultats très importants obtenus par M. Debierne (3).

Nous venons de rappeler qu'en faisant séjourner dans une même dissolution du chlorure de baryum avec un sel d'actinium très actif, on obtenait du chlorure de baryum actif. On a des effets bien plus intenses en précipitant du sulfate de baryte dans une solution contenant de l'actinium (toujours associé au thorium). Le sel actif est entraîné dans la précipitation; les produits sont ramenés à l'état de chlorure et l'actinium est séparé en le précipitant par

(1) *Proc. Roy. Soc.*, vol. 60, p. 409 (mai 1900).

(2) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 1583 (11 juin 1900) et t. CXXXI, p. 137 (16 juillet 1900).

(3) *Ibid. id.*, p. 333 (30 juillet 1900).

l'ammoniaque à l'état d'hydrate. Si le temps du séjour du baryum avec le sel actif a été suffisant, on peut obtenir du chlorure de baryum dont l'activité est plusieurs centaines de fois plus grande que celle de l'actinium.

Le baryum ainsi activé possède une partie des propriétés du radium.

Il reste actif après diverses transformations chimiques; son activité est donc une propriété atomique.

Le rayonnement émis ionise les gaz, provoque la phosphorescence des platinocyanures, impressionne les plaques photographiques; une partie est déviée dans un champ magnétique; et le chlorure anhydre est spontanément lumineux.

Le chlorure de baryum activé se fractionne comme le chlorure de baryum radifère. Lorsqu'on fait cristalliser ce sel dans l'eau ou dans une solution d'acide chlorhydrique, le chlorure qui cristallise est plus actif que celui qui reste en dissolution. Cette propriété a permis d'obtenir par des cristallisations fractionnées des produits mille fois plus actifs que l'uranium ordinaire. On a donc ainsi créé un produit qui ressemble au radium, mais qui n'en possède pas le spectre caractéristique; en outre, son activité diminue avec le temps. Nous verrons plus loin un phénomène semblable avec le sulfate de baryte activé par l'uranium.

La propriété qu'ont les corps activés de pouvoir être concentrés par fractionnement, et de se comporter comme des éléments chimiques distincts des corps non activés, doit inspirer la plus grande réserve dans les conclusions que l'on peut formuler relativement à la présence d'éléments nouveaux dans les préparations radioactives.

Il conviendra de discuter plus loin si ce n'est pas seulement une apparence et si ce qui paraît être une concentration de molécules actives n'est pas seulement une concentration progressive des propriétés de l'émanation sur certaines molécules matérielles. Bien des phénomènes s'éclairent à la faveur de cette hypothèse.

On a cité plus haut un travail intéressant de Sir W. Crookes (1) sur la radioactivité de l'uranium. Après avoir répété et varié diverses expériences relatives à l'action de l'uranium sur une plaque photographique, l'auteur fut conduit à purifier des cristaux de nitrate d'urane en les dissolvant dans l'éther; une partie se sépare sous forme de dissolution aqueuse. En soumettant à des cristallisations fractionnées les cristaux retirés de ces dissolutions, il observa : d'une part, que les cristaux plusieurs fois redissous dans de l'eau renouvelée étaient affaiblis au point de devenir inactifs, et, d'autre part, qu'à l'autre extrémité du fractionnement les cristaux recueillis ou les précipités des matières étrangères formés dans les eaux mères étaient très actifs. On conçoit très bien que ces expériences, faites avec l'idée que les corps faiblement actifs devaient leurs propriétés à des traces de matières excessivement actives, aient conduit Sir W. Crookes à les expliquer par l'existence d'une substance nouvelle qu'il a appelée Ur.X.

Mais en les comparant aux expériences de M. Debierne ainsi qu'à celles que j'ai eu l'occasion de réaliser à la même époque, et dont il va être question, on reconnaîtra que les produits actifs ne sont autres que des produits

(1) *Proc. Roy. Soc.*, vol. 60, p. 409 (mai 1900).

activés, et que l'affaiblissement des cristaux retirés de certaines solutions est un phénomène identique à celui qui résulte de la dissipation de l'émanation par les dissolutions.

La matière Ur.X est peut-être une matière distincte, mais il résulte des expériences que j'ai réalisées qu'elle n'est autre que l'émanation de l'uranium.

Au moment où j'ai eu connaissance des expériences de M. Bela v. Lengyel, je me suis proposé de rechercher si l'uranium avait bien une activité qui lui était propre, et, dans l'hypothèse qui était alors suggérée par la communication de M. Debierne sur l'actinium, on pouvait penser entraîner les traces du corps actif par des précipités de sulfate de baryte. En prenant du chlorure d'uranyle que l'on dissout dans l'eau, et en ajoutant à la solution un peu de chlorure de baryum, puis en précipitant le baryum à l'état de sulfate, on obtient un sulfate de baryum actif.

Dans une première expérience (1), une dissolution de quelques grammes de chlorure d'uranyle du commerce a été traitée ainsi deux fois de suite. Le chlorure de la dissolution traitée a été desséché et son activité mesurée par la vitesse avec laquelle il déchargeait un électroscope chargé à une vingtaine de volts. En prenant pour unité l'activité du chlorure d'uranyle non traité, celle du chlorure traité a été trouvée égale à 0,67 et l'activité du premier précipité de sulfate obtenu a été égale à 0,27.

Si, dans la solution d'une centaine de grammes de chlorure d'uranyle, on ajoute une très petite quantité de chlorure de baryum, le produit obtenu par une précipi-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 1583 (11 juin 1900).

tation ultérieure est relativement très actif, et peut devenir plus actif que le sel d'uranium, mais le sel d'uranium quoique affaibli reste toujours actif.

Cette opération a été poussée plus loin (1); après avoir pris une dissolution déterminée de chlorure d'uranyle et avoir prélevé un échantillon du sel, on a réalisé dans cette dissolution un grand nombre de précipitations successives de quantités de sulfate de baryum sensiblement proportionnelles à la quantité d'uranium de la dissolution; chaque fois on prélevait une petite quantité du chlorure de la dissolution; dans ces opérations, on n'a pas toujours conservé le précipité du sulfate de baryte. L'activité du sel d'uranium retiré des dissolutions successivement traitées a diminué progressivement. L'activité a été, soit observée par la photographie, soit mesurée par l'électroscope; la figure 70, Pl. XIII, montre l'action progressivement affaiblie des divers produits; en prenant pour unité l'activité du chlorure non traité, on a obtenu avec l'électroscope les nombres suivants :

Nombre de précipitations ou numéros des produits.	0	2	3	12	15	17	18
Activité relative.	1	0,86	0,82	0,67	0,65	0,47	0,30

Ces nombres très approximatifs ne sont donnés ici que comme une indication de l'affaiblissement; ils semblent ne pas suivre une progression aussi rapide que l'affaiblissement de l'activité sur une plaque photographique.

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXI, p. 137 (16 juillet 1900).

En outre, avec la plaque photographique, l'absorption au travers du papier noir, puis au travers de lamelles de verre de $0^{mm},1$ d'épaisseur ou de lamelles d'aluminium de même épaisseur, n'a pas paru varier exactement de la même manière. L'aluminium a paru un peu plus transparent que le verre pour le rayonnement des produits non traités ou pour celui des premiers traitements, tandis que la transparence de l'aluminium a paru plutôt moindre que celle du verre pour les produits à partir du n° 12.

Afin d'avoir des produits inaltérables à l'air humide on a transformé une partie de chaque échantillon en oxyde noir. Sous cette forme les produits disposés sur des plaques photographiques ont montré encore un affaiblissement progressif, mais moins accentué que les chlorures. Comme il s'était écoulé plusieurs jours entre ces séries d'expériences, il faut peut-être faire intervenir l'effet d'une récupération partielle d'activité dont il sera question ci-après.

On observe, dans l'activité des produits retirés après les traitements successifs, des irrégularités qui apparaissent aussi bien avec la plaque photographique qu'avec la mesure de l'ionisation qu'ils produisent dans l'air. Ces irrégularités peuvent être dues, en partie, à des irrégularités dans les proportions de matières employées dans les traitements successifs, irrégularités qui ont été soigneusement évitées dans les expériences ultérieures.

A la même époque, M. Lecoq de Boisbaudran m'avait remis deux échantillons de nitrate d'uranyle qui étaient les termes extrêmes d'un fractionnement par cristallisation effectué avec le plus grand soin. Ces cristaux étaient

préparés depuis longtemps. J'ai trouvé les deux échantillons absolument identiques, soit dans leur action sur une plaque photographique, soit dans leur action sur l'électroscope.

Ce fait venait s'ajouter à une observation qui m'avait frappé au commencement de mes recherches, et qui plus tard avait également été signalée par M. et Mme Curie. C'était que l'activité d'un composé déterminé d'uranium pris dans le commerce ou dans un laboratoire était toujours la même quelle qu'en soit la provenance, et, par suite, quels que soient les traitements antérieurement subis. Cette constatation paraissait du reste suffisante pour établir l'existence d'une activité propre à l'uranium.

Or, puisque les sels d'uranium peuvent avoir été affaiblis à un moment donné et qu'on ne constate plus cet affaiblissement, on devait en conclure que les sels d'uranium reprenaient avec le temps leur activité primitive. Les propriétés des corps activés, mises en évidence par les expériences de M. et Mme Curie et de M. Debierne, m'avaient conduit en outre à une hypothèse (1) aboutissant à la même conclusion.

Si les corps actifs peuvent activer les corps voisins par une fixation de leur « *émanation* », ils doivent activer de même, et très énergiquement, les matières inactives mélangées avec eux, peut-être également activer les molécules des corps combinés avec leurs molécules, et peut-être aussi activer leurs propres molécules. Je dévelop-

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIII, p. 978 (9 décembre 1901).

perai plus loin cette hypothèse. Dans tous les cas, elle conduisait aux résultats suivants : les phénomènes observés dans l'affaiblissement des sels d'uranium et dans l'activation des précipités devaient être temporaires; les corps seraient activés aux dépens de l'émanation soustraite au mélange; la dissipation de cette émanation intermoléculaire serait favorisée par la dissociation électrolytique dans les solutions.

S'il en était ainsi : 1° les sels d'uranium affaiblis devaient reprendre spontanément leur activité primitive en fixant une partie de l'émanation produite par l'activité propre des molécules; 2° les précipités activés devaient perdre leur activité, ce qui ne se produirait pas si ceux-ci avaient entraîné une matière spontanément active.

Or, l'expérience a pleinement confirmé ces conclusions. En décembre 1901, j'ai de nouveau examiné les produits dont il vient d'être question et qui avaient été préparés dix-sept mois auparavant. Les produits uraniques progressivement affaiblis avaient tous repris leur activité première. Les préparations de chlorure, ou du moins celles qui, conservées à l'air, n'avaient pas été altérées, depuis le n° 1 jusqu'au n° 18, avaient la même activité, soit sur la plaque photographique, comme le montre la figure 71, Pl. XIII, soit encore à l'électromètre. Il en a été de même pour les oxydes. Les comparaisons ont été faites avec les échantillons mêmes qui avaient servi aux expériences de 1900.

Par contre, le sulfate de baryte, qui en juillet 1900 était plus actif que l'uranium, a été trouvé en décembre 1901 complètement inactif. L'activité qu'il avait acquise était

donc un phénomène de la nature de l'activité induite, comme dans les expériences de M. Debierne avec l'actinium. La précipitation n'avait entraîné aucune matière douée d'une activité permanente.

Ces faits m'ont conduit à cette époque à une série d'expériences et de mesures qui n'ont pas été publiées parce que la concordance des résultats ne m'avait pas paru suffisante; je comptais reprendre plus tard la question.

Je m'étais proposé de rechercher, dans l'hypothèse où une « émanation » serait mise en liberté par la dissociation électrolytique dans les solutions étendues, s'il y aurait une différence entre l'activité des précipités formés dans des solutions concentrées et dans des solutions étendues.

Le 18 décembre 1901 on a fait une solution saturée de chlorure d'uranyle, à la température de 14°5, et une solution de 4 grammes de chlorure de baryum dans 5 centimètres cubes d'eau. On a pris deux portions de la première solution, de 10 centimètres cubes chacune; dans la première on a versé 2 centimètres cubes de la solution de baryum; la seconde a été étendue d'abord à 200 centimètres cubes d'eau, puis on y a versé 2 centimètres cubes de la solution de baryum. Chaque mélange est resté ainsi environ une heure, puis on a précipité le baryum à l'état de sulfate en versant goutte à goutte une solution d'acide sulfurique au cinquième. On a obtenu ainsi un précipité (*a*) avec la solution concentrée et (*b*) avec la solution étendue. Ces précipités, lavés et séchés, ont été examinés immédiatement après avec la disposition électrique figure ci-contre (fig. 34); cette disposition consistait essen-

tiellement en un plateau de cuivre isolé et relié à un électromètre. Ce plateau était placé à l'intérieur d'un cylindre de cuivre isolé, et porté au potentiel de 200 volts. La partie inférieure du cylindre était fermée par une feuille d'aluminium battu, parallèle au plateau, et à quelques cen-

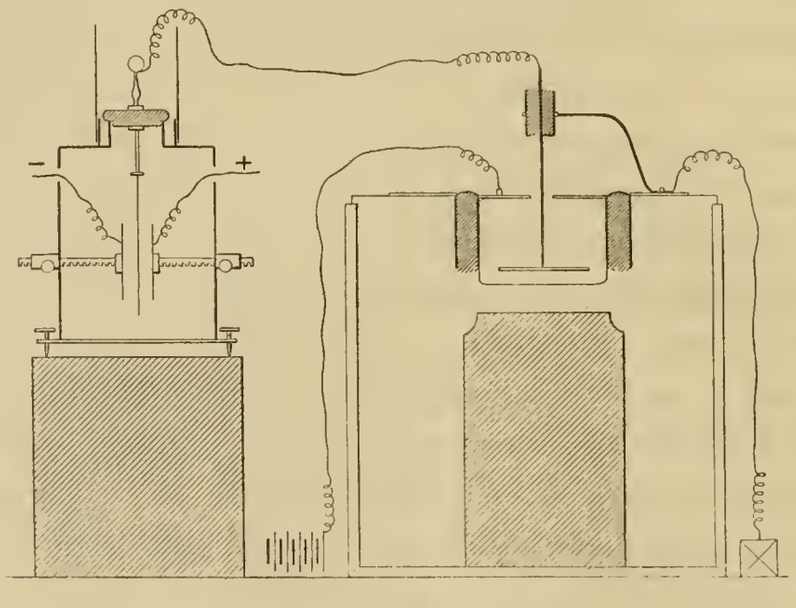


Fig. 84.

timètres au-dessous de celui-ci, on plaçait le corps radioactif à étudier, au-dessous de la feuille d'aluminium.

Les courants obtenus, mesurés, comme il a été dit plus haut, par la vitesse de la charge exprimée en volts par seconde, ont été, $0^v,064$ pour (*a*) et $0^v,071$ pour (*b*); le 20 décembre on a encore obtenu $0^v,065$ pour (*a*) et $0^v,075$ pour (*b*). Le produit précipité dans la solution étendue a été le plus actif.

Les résultats obtenus en étendant davantage les solutions n'ont pas été les mêmes. Le 18 décembre 1901, on a préparé les mélanges suivants : On a pris une solution

de chlorure d'uranyle un peu moins concentrée que la précédente, et on a encore prélevé deux portions de 20 centimètres cubes. A la première on a ajouté 4 centimètres cubes d'une solution saturée de chlorure de baryum. On a fait la même opération pour la seconde après avoir étendu le volume de la solution à deux litres. Ces solutions ont passé la nuit ainsi mélangées: la solution concentrée dans un flacon bouché, la solution étendue dans un vase cylindrique largement ouvert. Le lendemain 19 décembre, on a précipité le baryum en ajoutant à chaque solution 55 gouttes d'une solution d'acide sulfurique au dixième; les précipités, C de la solution concentrée et E de la solution étendue, ont été filtrés à chaud, lavés, séchés, et leur activité a été mesurée immédiatement après vers 4 heures du soir.

On a opéré sur 1 gramme de précipité de chaque nature, mis dans des cuves plates en plomb ayant la même surface. Les activités mesurées à divers intervalles ont donné les valeurs relatives suivantes exprimées par l'accroissement de potentiel de l'électromètre en une seconde.

DATES.	PRÉCIPITÉ C.		PRÉCIPITÉ E.	
	v		v	
19 décembre 1901	0,0709	1	0,0489	1
20 —	0,0842	1,187	0,0592	1,210
21 —	0,0714	1,007	0,0538	1,100
23 —	0,0653	0,921	0,0488	1,000
24 —	0,0626	0,882	0,0436	0,891
26 —	0,0572	0,806	0,0380	0,777
28 —	0,0527	0,746	0,0353	0,722

Il s'est produit d'abord une augmentation temporaire dans l'activité des deux préparations, puis l'activité a diminué régulièrement avec le temps. Dans ces expériences, contrairement au résultat obtenu plus haut, l'activité du précipité formé dans la solution étendue a été moindre que celle du précipité formé dans la solution saturée.

Ce résultat aurait pu être attribué à la dissipation de l'émanation dans l'atmosphère. On a refait alors une nouvelle série en prélevant deux portions de 20 centimètres cubes d'une solution concentrée de chlorure d'uranyle, et en étendant le volume de l'une d'elles à un litre. La précipitation du sulfate de baryum et la mesure de l'activité du précipité séché ont été faites le même jour, et on a obtenu $0^{v},0862$ pour mesure de l'activité du précipité de la solution concentrée et $0^{v},0747$ pour le précipité de la solution étendue; ces résultats sont dans le même sens que les précédents.

Pour confirmer l'absence d'effet attribuable à une dissipation de l'émanation dans l'air, on a préparé deux dissolutions identiques, formées de 20 centimètres cubes d'une solution saturée de chlorure d'uranyle, de 4 centimètres cubes d'une solution saturée de chlorure de baryum, le tout étendu à un volume total de 1 litre. L'une des solutions a été enfermée dans un ballon scellé à la lampe, l'autre dans un ballon ouvert. Ces solutions préparées le 27 décembre 1901 ont été laissées ainsi pendant 13 jours, jusqu'au 9 janvier 1902; on a précipité alors le baryum de ces solutions, et les précipités de sulfate de baryte ont donné à l'électromètre : $0^{v},0718$ pour le précipité recueilli dans le liquide du ballon qui avait été fermé, et $0^{v},0779$ pour celui du ballon ouvert.

La différence est faible, et peut être imputée en partie aux erreurs d'expérience. Dans tous les cas cette différence est de sens contraire à celle qui indiquerait une dissipation de l'émanation dans l'air, comme cela s'observe avec le radium.

Cette conclusion était du reste à prévoir, car on n'a pas observé jusqu'ici d'émanation produite par l'uranium dans les gaz, et c'est seulement par analogie avec les autres phénomènes d'activité induite que l'on a été conduit à admettre dans les dissolutions un phénomène de l'ordre d'une émanation qui y resterait confinée.

Dans les préparations précédentes il a pu se produire une cause d'erreur; si, au moment de la précipitation du sulfate de baryte dans les solutions très étendues, le mélange n'est pas agité de façon à provoquer un contact intime entre les diverses parties de la solution, il peut arriver que certaines parties du précipité se forment dans une région déjà appauvrie par les premières parties de la précipitation, et que le précipité soit moins actif qu'il ne devrait l'être. J'ai alors repris récemment une série de mesures sur des précipités préparés avec le plus grand soin de la manière suivante :

Le 17 mars 1903, 100 grammes de chlorure d'uranyle pur du commerce ont été dissous dans 100 centimètres cubes d'eau. On a divisé cette solution en 5 parties égales de 20 centimètres cubes; l'une a été mise à part et a constitué la solution A; deux autres parties ont été étendues à 200 centimètres cubes (solutions B et B'); une quatrième partie a été étendue à 500 centimètres cubes, solution C, et enfin la dernière partie a été étendue à

1000 centimètres cubes, solution D. Ces solutions ont été préparées entre 5 et 6 heures du soir et dans l'une d'elles (solution B′) on a ajouté 4 centimètres cubes d'une solution concentrée de chlorure de baryum ; puis le tout a été abandonné jusqu'au lendemain.

Le 18, à 5 heures du soir, on a ajouté dans les quatre autres solutions 4 centimètres cubes de la solution de chlorure de baryum, et on a précipité le baryum de la solution B′ en ajoutant 54 gouttes d'une solution d'acide sulfurique au dixième, et on a laissé le précipité activé en contact avec la solution jusqu'au lendemain.

Le 20, on a précipité successivement le baryum de chacune des autres solutions, on a filtré à chaud et séché à l'étuve; puis on a mesuré, à divers intervalles de temps, l'activité de 1 gramme de chaque précipité, en la comparant chaque fois à celle de 1 gramme d'oxyde noir d'uranium; chacun de ces produits était placé dans des cuves plates en plomb, ayant toutes les mêmes dimensions.

Les mesures sont résumées dans le tableau ci-contre.

On voit que les produits se partagent en deux classes : 1° Les précipités dans les solutions peu étendues, A, B, B′, et B′, qui a séjourné plus longtemps au contact de l'uranium, est plus actif que B; 2° Les précipités dans les solutions très étendues qui sont pratiquement identiques entre eux et plus actifs que les précédents. La loi de la disparition de l'activité est la même pour tous les produits, et, après le maximum du 21, l'activité le 4 avril est réduite environ aux deux tiers pour tous les produits.

DATES.	PRÉCIPITÉ A.		PRÉCIPITÉ B.		PRÉCIPITÉ B'.		PRÉCIPITÉ C.		PRÉCIPITÉ D.	
20 mars 1903.	fin du séchage à 11h30 du matin.		fin du séchage à 1h30 du soir.		fin du séchage à 11h10 du matin.		fin du séchage à 3h45 du soir.		fin du séchage à 4h40 du soir.	
	h. m.		h. m.		h. m.		h. m.		h. m.	
20 mars 1903.	4.24	0,69	»	»	4.55	0,76	5. 7	0,95	5.18	0,96
21 —	9.12	0,63	9.25	0,65	9.45	0,76	10. 2	0,91	10.10	0,92
21 —	5. 7	0,66	5.15	0,73	5.20	0,76	5.25	0,96	5.30	0,98
22 —	7.55	0,66	8. 8	0,71	8.12	0,73	8.21	0,91	8.25	0,92
23 —	1.55	0,61	1.59	0,66	2. 9	0,69	2.19	0,91	2.26	0,88
24 —	9.15	0,59	9.30	0,65	9.38	0,68	9.45	0,88	9.52	0,88
25 —	9.49	0,58	9.57	0,62	10. 5	0,67	10.15	0,85	10.21	0,85
26 —	10.18	0,55	10.30	0,58	10.43	0,62	10.50	0,77	11. 0	0,83
28 —	4.55	0,54	5. 5	0,57	5.10	0,63	5.25	0,80	5.35	0,80
30 —	6.20	0,51	6.30	0,57	6.40	0,63	6.50	0,82	7.10	0,77
4 avril 1903.	4.25	0,41	4.30	0,45	4.39	0,51	4.46	0,63	4.57	0,60

Si l'on représente le décroissement de l'intensité en fonction du temps par une expression de la forme $I = I_0 e^{-\lambda t}$, et si l'on prend pour unité le jour, on a, pour la constante relative aux diverses séries, depuis le 21, jour à partir duquel les produits ont commencé à décroître :

A	$\lambda = 0,035$
B	0,030
B'	0,028
C	0,034
D	0,034

On voit que pratiquement la loi de la diminution de l'intensité peut être considérée comme la même (1).

Ces séries montrent que si l'opération est faite bien

(1) Au cours de cette rédaction j'ai eu connaissance d'un travail de M. Rutherford. *Phil. Mag.*, avril 1903, qui donne exactement le même nombre : $\lambda = 0,031$ pour le décroissement d'un produit activé par l'uranium.

régulièrement, les précipités obtenus dans les solutions étendues sont plus actifs que ceux des dissolutions concentrées.

A l'époque de mes premières recherches sur cette question, j'ai analysé par le champ magnétique le rayonnement émis par les diverses substances activées dans mes expériences. J'ai reconnu d'abord (1) que l'impression photographique obtenue avec l'uranium ne décèle pas de rayons semblables aux rayons α; elle ne manifeste que des rayons déviables β.

Le sulfate de baryte activé par l'uranium (2) dans les expériences précédemment décrites, même lorsque le produit est notablement plus actif que l'uranium, ne donne également qu'une impression déviable, dépourvue de rayons α. Le thorium et le radium, au contraire, ainsi que les produits activés par ces corps, donnent des impressions où l'on reconnaît l'action des deux espèces de rayons.

L'absence de rayons α dans les impressions photographiques produites par l'uranium est un caractère qui établit une nouvelle distinction entre l'activité de l'uranium et celle du thorium et du radium, caractère que l'on retrouve dans le rayonnement des substances activées par ces divers corps.

Plus tard, M. Rutherford a signalé ces mêmes phénomènes.

Il convient de résumer ici une série de mémoires éten-

---

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, t. CXXXIV, p. 208 (27 janvier 1902).

(2) H. Becquerel, *Conférence à la Royal Institution*, Londres, 8 mars 1902.

dus publiés par M. Rutherford et dans lesquels, à côté de faits déjà observés par d'autres expérimentateurs, se trouvent un certain nombre de constatations nouvelles et importantes. Je passerai généralement sous silence les vues théoriques émises, parce que l'auteur lui-même a été amené à les modifier continuellement dans ses publications successives, et je signalerai dans le dernier chapitre celles de ces vues qui me paraissent devoir être retenues.

Dans une publication (1) sur l'émanation radioactive produite par les composés du thorium, M. Rutherford observe que les solutions dont le thorium a été précipité par l'ammoniaque sont encore radioactives et douées d'un pouvoir d'émanation. L'oxyde de thorium précipité est affaibli. Si l'on agite dans de l'eau de l'oxyde de thorium qui n'est pas soluble, qu'on l'en sépare, puis qu'on évapore l'eau, on obtient un résidu très actif.

A l'exemple de ce qu'avait proposé Sir W. Crookes pour l'uranium, M. Rutherford, pour expliquer les faits qu'il a observés, admet l'existence d'un corps nouveau très actif, différent du thorium, le ThX.

En juillet 1902 (2) dans un autre travail, le même auteur, après avoir rappelé ou retrouvé des faits établis antérieurement, émet une série d'hypothèses que ses expériences ultérieures le conduisent à modifier. Les observations nouvelles que contient ce travail sont relatives au tho-

---

(1) Rutherford et F. Soddy, *Proceedings of the Chemical Society*, 16 janvier 1902.

(2) Rutherford et Miss H. T. Brooks. *Phil. Mag.*, 6e série, vol. IV, p. 1 (juillet 1902).

rium et surtout à l'émanation produite par ce corps. L'émanation du thorium se transporte à distance comme celle du radium, conformément aux expériences de MM. Curie et Debierne. L'auteur rappelle qu'il avait déjà reconnu en 1900 que la radioactivité induite par le thorium diminue de moitié en onze heures.

Peu après (1) M. Rutherford constate que les corps activés par l'émanation du thorium dans les solutions (le ThX d'après son hypothèse) émettent des rayons déviables, des rayons non déviables, et une émanation, tandis que les corps activés par leur mélange avec l'Uranium (l'UrX de Crookes) émettent uniquement des rayons déviables, phénomène que j'avais déjà signalé.

Ces diverses observations ont été étendues et complétées dans un mémoire important (2), sur « *la cause et la nature de la radioactivité* » qui a paru en deux parties dans le *Philosophical Magazine* en septembre et novembre 1902, et dans lequel l'auteur ne résout malheureusement pas ces deux questions.

Étudiant d'abord la disparition de l'activité de l'émanation du thorium, il trouve que celle-ci diminue de moitié en une minute et demie. Puis poursuivant l'hypothèse rappelée plus haut, M. Rutherford cherche à isoler un corps actif autre que le thorium, sans pouvoir mettre en évidence aucun caractère différent de ceux du thorium.

Il est conduit à observer, comme je l'avais fait anté-

---

(1) Rutherford et E. Grier. *Phil. Mag.*, 6e série, vol. IV, p. 315 (septembre 1902).

(2) Rutherford et F. Soddy, *Phil. Mag.*, 6e série, vol. IV, p. 370 et 569 (septembre et novembre 1902).

rieurement pour l'uranium, que les préparations affaiblies reprennent avec le temps leurs propriétés ordinaires, et il déduit de ce fait cette conséquence que l'activité normale ou constante du thorium résulte d'un équilibre entre l'accroissement de la radioactivité et la disparition de l'activité de la matière ThX formée à chaque instant; nous discuterons plus loin ce point de vue.

Ces considérations conduisent l'auteur à une étude des lois de la disparition de l'activité de ce qu'il appelle ThX, et de la récupération de l'activité des produits affaiblis. Ces lois sont complémentaires l'une de l'autre; les fonctions $e^{-\lambda t}$ et $(1-e^{-\lambda t})$ qui représentent la variation relative des deux phénomènes avec le temps t, sont caractérisées par la même constante λ pour la déperdition et la récupération, et cette constante correspond à une diminution de moitié en quatre jours. On a vu plus haut que M. Curie avait trouvé pour l'activité induite par le radium, soit dans la période d'établissement, soit dans la période de diminution, la même valeur de la constante λ.

L'oxyde de thorium précipité par l'ammoniaque est affaibli, et la solution reste active. M. Rutherford exprime ce fait en disant que le thorium est débarrassé du ThX. Tous les autres réactifs précipitent le thorium sans laisser de radioactivité à la solution, dont les résidus évaporés sont inactifs. L'auteur attribue cette différence aux propriétés chimiques du ThX entraîné avec le thorium. Cependant l'activité de ce corps hypothétique n'est influencée par aucun agent connu, non plus que par l'état physique ou chimique des molécules, à l'air libre, ou dans un ballon scellé à la lampe.

M. Rutherford avait reconnu l'accroissement temporaire d'activité qui précède la déperdition régulière des produits activés ainsi que la diminution qui précède la période de récupération des produits affaiblis. Il attribua ces perturbations à la fixation d'une partie de l'émanation sur la matière inactive ambiante, hypothèse identique à celle que j'avais émise antérieurement. Dans les différentes opérations auxquelles a été soumis le thorium, il n'a pas été possible de lui enlever la totalité de son activité.

La seconde partie du Mémoire de M. Rutherford est encore un développement des faits dont nous avons rappelé les principaux. Il avait vu antérieurement qu'une calcination intense enlève à l'oxyde de thorium la propriété d'émettre l'émanation sans altérer son rayonnement. L'émanation reparaît si l'oxyde s'hydrate ou subit des actions chimiques. Si l'on transporte l'émanation par un courant d'acide carbonique directement activé par le thorium, et qu'on absorbe ce gaz, après l'avoir mélangé à un gaz inerte, l'émanation reste dans ce dernier gaz. L'auteur observant qu'elle se comporte comme un gaz inerte émet l'hypothèse qu'elle pourrait être un gaz de la famille de l'argon et de l'hélium, hypothèse suggérée par la présence de l'hélium dans les minerais uranifères, et émise comme quelques autres sans aucune sanction expérimentale. Parmi celles-ci cependant, il convient de signaler l'hypothèse qui attribuerait le transport de l'émanation à des ions positifs.

Une hypothèse du même genre a été émise par M. Curie (1)

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 226 (26 janvier 1903).

qui considère l'émanation comme formée de centres activants émis par les corps actifs.

Dans une note sur la radioactivité produite par les sels d'actinium (1), M. Debierne a développé la même hypothèse, d'après laquelle l'émanation serait constituée par des *ions activants* dont l'énergie s'épuiserait peu à peu avec le temps. M. Debierne a reconnu, en outre, que, dans le cas de l'actinium, l'activation provoquée dans une enceinte fermée est beaucoup plus intense dans le voisinage immédiat de la source que dans les parties éloignées, où elle est très faible. Lorsqu'on fait continuellement le vide dans l'enceinte, l'activation se produit très facilement et uniformément dans toutes les parties. M. Debierne explique ces différentes particularités par la rapidité de la diminution du pouvoir activant de l'émanation, diminution qui est du même ordre que celle de l'émanation du thorium, laquelle tombe de moitié en une minute et demie. La diffusion se ferait plus vite dans le vide que dans l'air, et l'appareil à vide n'éliminerait que des centres déjà épuisés. M. Debierne a observé en outre que l'activation produite par l'actinium, dans le voisinage de la source, diminue suivant une loi plus rapide, qui correspond à une variation de moitié de sa valeur en quelques secondes.

D'après M. Debierne, les centres activants émettent un rayonnement qui produit l'activation. Dans un champ magnétique l'activation sur deux plaques disposées de part et d'autre de la source, parallèlement au champ,

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 446 (16 janvier 1903).

n'est pas la même. La lame qui s'active le plus est celle qui est située du côté opposé à celui où sont rejetés les rayons cathodiques.

Sans discuter ici la valeur de ces diverses hypothèses, nous appellerons l'attention sur quelques rapprochements qui résultent de ces expériences.

Les corps activés par les solutions de thorium (le Th.X de M. Rutherford) perdent leur activité suivant la même loi de décroissement que l'émanation du radium (diminution de moitié en quatre jours). L'émanation du thorium et l'émanation de l'actinium perdent leur activité suivant une même loi, qui correspond à une diminution de moitié en une minute et demie.

Bien que les diverses constantes de temps qui caractérisent la disparition des phénomènes induits provoqués par le radium, le thorium, l'actinium et l'uranium, soient généralement très différentes, il en est, parmi celles-ci, qui ont la même valeur, et ce fait suggère, pour certaines manifestations de la radioactivité, l'idée d'une communauté d'origine.

M. Rutherford a observé récemment que l'émanation se condense à la température de l'air liquide. M. Curie a vérifié ce fait par l'expérience suivante : un réservoir de verre de grand volume, terminé par un tube capillaire, contient l'émanation du radium ; si l'on plonge le tube dans l'air liquide, toute l'émanation s'y condense. En séparant, à la lampe, le tube capillaire, on constate que le gros réservoir est devenu inactif, et que le tube capillaire, devenu très actif, contient toute l'émanation.

Cette expérience peut se répéter sous une forme très

brillante (1) : deux réservoirs, de capacité inégale, B et C, communiquent par un tube capillaire muni d'un robinet R′; dans ces deux réservoirs, on met du sulfure de zinc phosphorescent, et on fait le vide. Le grand réservoir B peut communiquer par un tube muni d'un robinet R avec une ampoule A contenant une solution d'un sel de radium. On ouvre R; l'air chargé d'émanation pénètre dans B et C et le sulfure de zinc s'illumine instantanément. On ferme le robinet R et on plonge C dans l'air liquide; au bout d'une demi-heure le réservoir B a perdu sa luminosité. On ferme le robinet R′ et si l'on retire le réservoir C de l'air liquide, le sulfure de zinc de ce réservoir devient très lumineux. La matière lumineuse était moins brillante quand C plongeait dans l'air liquide, parce qu'à cette basse température elle perd une partie de ses propriétés phosphorescentes.

On peut classer dans la catégorie des substances activées des sels de plomb préparés par MM. Hofmann et Strauss (2), et dont l'activité temporaire avait été attribuée à la présence d'une substance active, que ces auteurs ont appelée « *radioblei* ».

Nous ajouterons, en terminant, que M. F. Giesel (3) a retiré récemment de la pechblende un produit actif dont l'activité ne paraît pas avoir diminué en six mois, mais qui n'a pas encore été identifié avec un corps connu ou caractérisé comme corps nouveau.

---

(1) *Journal de Physique*, 4e série, t. II, p. 547.

(2) *Berichte der Deut. Chemischen Gesellschaft*, Bd. XXIII, s. 3126 (1900); Bd. XXXIV, s. 8, 407, 907, 3033, 3970 (1901).

(3) *Berichte der Deut. Chemischen Gesellschaft*, t. CXXXVI, p. 342 (1903).

CHAPITRE IX

RÉSUMÉ DES PRINCIPAUX FAITS OBSERVÉS. CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

§ 1. — *Résumé des faits observés.*

Avant d'exposer les considérations théoriques au moyen desquelles on a cherché à coordonner ou même à expliquer les phénomènes de radioactivité, il nous a semblé nécessaire de résumer les faits fondamentaux décrits et démontrés dans les chapitres précédents, aussi bien que ceux qui ont été découverts par divers observateurs.

Ces faits sont indépendants de toute théorie; à mesure que leur nombre s'accroît, les théories se modifient, et dans l'examen critique de celles-ci il importe d'avoir présents les faits d'expérience qui les dominent toutes.

Je rappellerai donc qu'en 1896 j'ai reconnu l'existence d'un rayonnement émis par l'uranium et par les sels de ce métal. Ce rayonnement agit sur une plaque photographique et décharge les corps électrisés en rendant conducteurs les gaz qui les enveloppent. Ces deux actions ont

été les bases des deux principales méthodes au moyen desquelles on a étudié la radioactivité.

Le rayonnement de l'uranium est en apparence spontané, permanent et indépendant des variations de la température et des autres conditions extérieures. Il correspond à une dépense d'énergie dont la source nous échappe encore.

Ce rayonnement est pénétrant et hétérogène ; il provoque sur les corps qu'il rencontre un rayonnement secondaire.

Deux ans après ces observations, M. Schmidt observa l'activité du thorium, puis M. et Mme Curie découvrirent de nouveaux corps radioactifs : le polonium et le radium. Ce dernier corps seul est caractérisé comme corps simple nouveau par son spectre et par son poids atomique. Le rayonnement de ces corps fut assez intense pour exciter la phosphorescence des platino-cyanures ou d'autres substances ; le rayonnement du radium rend lumineuse la préparation qui contient la substance active. M. et Mme Curie sont parvenus à préparer des sels de radium à peu près purs dont l'activité est près de un million de fois plus grande que celle de l'uranium. A ces substances actives il faut joindre l'actinium de M. Debierne et un produit actif associé au plomb, obtenu par M. Giesel. Récemment M. Marckwald a obtenu un bismuth actif, qui peut être du polonium mais dont l'activité ne diminue pas avec le temps.

M. et Mme Curie et M. Rutherford observèrent simultanément un phénomène autre que le rayonnement. M. et Mme Curie reconnurent que tous les corps en présence du radium deviennent temporairement radioactifs, et ils appelèrent ce phénomène la « *radioactivité induite* ».

M. Rutherford observa qu'à côté de la radiation proprement dite plus ou moins pénétrante il se produisait des manifestations d'activité liées à la matière gazeuse, et il appela ce phénomène une « *emanation* ». La radioactivité induite est produite par l'émanation.

En 1899, M. Giesel, puis MM. Meyer et v. Schweidler reconnurent l'influence d'un champ magnétique sur le rayonnement de préparations actives. Je fis indépendamment la même observation, puis je reconnus dans le polonium l'existence de rayons qui semblèrent d'abord non déviables et dont M. Curie montra la coexistence avec des rayons déviables dans le rayonnement du radium. On a vu dans les chapitres précédents comment l'action d'un champ magnétique permettait d'analyser le rayonnement déviable comme le prisme permet d'analyser un faisceau lumineux.

M. Curie montra qu'une partie pénétrante du rayonnement du radium transportait des charges électriques négatives, et récemment il reconnut que les préparations très actives du radium dégagent de la chaleur. MM. Curie et Dewar ont observé que, dans une enceinte entourée d'hydrogène liquide, le radium, à cette basse température, émet de la chaleur et provoque dans le liquide un dégagement continu d'hydrogène gazeux.

Ainsi les corps radioactifs présentent deux ordres de phénomènes intimement liés l'un à l'autre, la radiation et l'émanation. Celle-ci se manifeste avec le thorium et le radium à divers degrés suivant l'état physique des matières actives. L'uranium et les sels de ce métal ne manifestent pas le phénomène de l'émanation dans les gaz.

Rayonnement. — Les recherches de divers observateurs

et en particulier les recherches présentes ont permis d'analyser le phénomène de la radiation.

Le rayonnement des corps radioactifs se compose de trois types de radiations.

1° Les rayons α que j'ai observés pour le première fois avec le polonium, dont M. Rutherford a démontré la faible déviabilité magnétique inverse de celle des rayons β. On a vu que ces rayons constituent un faisceau de radiations homogènes doucés de la même déviabilité magnétique.

2° Les rayons déviables ou rayons β qui ont révélé pour la première fois l'existence des corps radioactifs et que les diverses expériences, relatées dans les chapitres précédents, ont démontré être identiques à des rayons cathodiques transportant des charges électriques négatives.

3° Les rayons non déviables pénétrants, ou rayons γ, observés d'abord au travers de lames de plomb, et dont M. Villard a le premier reconnu le caractère de non déviabilité. Ces rayons paraissent analogues aux rayons X; ils comprennent des radiations inégalement pénétrantes et l'hétérogénéité du faisceau n'a pu être reconnue que par les effets produits au travers des écrans absorbants.

L'analyse de la radiation des corps actifs a donc conduit à reconnaître la présence des trois types qui sont produits par les décharges électriques dans les tubes à gaz raréfiés.

Ces trois types produisent des actions chimiques, ionisent les gaz, et les deux derniers provoquent des rayons secondaires sur les corps qu'ils frappent. Ils ont des intensités relatives inégales dans le rayonnement des différents corps actifs.

Le faible rayonnement de l'uranium ne manifeste avec

une intensité notable que les rayons β. Cependant les effets observés au travers d'enveloppes métalliques très épaisses témoignent de l'existence de rayons très pénétrants émis par l'uranium, mais on n'a pas encore démontré si ces rayons appartenaient à la catégorie des rayons β ou à celle des rayons γ, bien que la dernière supposition soit la plus probable. L'uranium émet encore des rayons très absorbables, très actifs pour ioniser l'air, mais il n'est pas démontré qu'ils appartiennent au type des rayons α, et leur caractère d'absorption ne suffit pas pour les classer dans cette catégorie.

Le polonium ne manifeste pas de rayons β. Il émet temporairement avec une grande intensité des rayons α et j'ai reconnu récemment que ce corps émet des rayons très pénétrants de la nature des rayons γ.

Le thorium et le radium émettent les trois espèces de rayons.

L'étude du rayonnement des corps actifs a contribué pour une large part au progrès de nos connaissances sur les rayons cathodiques; en particulier elle a permis d'aborder l'analyse d'un faisceau et l'application à des rayons simples de considérations dérivées de la théorie balistique. On a vu comment les expériences de M. Kaufmann avaient soulevé une question mettant en doute l'existence même des masses théoriques.

Émanation. — Le phénomène de l'émanation paraît intimement lié au mécanisme même de l'activité. Bornons-nous d'abord à l'exposé des faits d'expérience.

L'émanation du thorium se comporte comme un gaz; elle est arrêtée par toute enveloppe imperméable aux gaz,

si mince qu'elle soit. Elle se concentre sur les corps électrisés négativement, et les rend temporairement actifs (Rutherford).

La présence de l'émanation est nécessaire pour provoquer la radioactivité induite par le radium; le rayonnement ne produit pas d'induction. Toute enveloppe qui arrête les gaz arrête l'émanation et s'oppose au phénomène d'activation. La propriété d'activer les corps se transmet par les gaz dans toutes les parties d'une enceinte fermée; les corps s'y activent uniformément, indépendamment de leur nature. L'activation est d'autant plus intense que l'espace libre en présence de la surface qui s'active est plus grand. L'activation décroît avec le temps à partir du moment où le radium a été séparé de l'enceinte activante. Si l'enceinte est fermée l'émanation décroît d'intensité de façon à diminuer de moitié en quatre jours. Si l'enceinte est ouverte, ou si les corps activés sont à l'air libre, leur activité diminue de moitié en une demi-heure. Si les corps ont séjourné plusieurs mois dans une enceinte activante, l'activité induite après être tombée à 0,00005 environ de sa valeur initiale, suivant la loi précédente, ne diminue plus ensuite qu'avec une extrême lenteur. L'activation se produit dans une enceinte fermée même lorsque le vide y a été fait aussi parfaitement que possible, mais si l'on entretient le vide en faisant fonctionner d'une manière continue la pompe à mercure, l'activation ne se produit plus (Curie).

L'émanation se diffuse dans l'air avec la même vitesse qu'un gaz dans un autre gaz et se condense dans un tube qui plonge dans l'air liquide.

De son côté M. Rutherford a obtenu pour le décroissement avec le temps de l'intensité de l'émanation du radium la valeur trouvée par M. Curie pour la disparition de l'activité induite et il a reconnu que pour l'émanation du thorium l'intensité diminuait de moitié en une minute et demie. Cette dernière valeur a été aussi trouvée par M. Debierne pour la diminution d'intensité de l'émanation de l'actinium.

L'émanation est favorisée par l'état de dissolution des corps : l'activation dans une enceinte fermée est plus grande en présence d'une certaine quantité de sel actif en solution, qu'en présence du même produit à l'état solide. Une calcination intense fait perdre à l'oxyde de thorium la faculté d'émettre l'émanation; l'oxyde calciné reprend cette faculté si on le dissout pour le précipiter de nouveau.

Lorsqu'on dissout un sel de radium et qu'on le ramène ensuite à l'état sec, on constate une diminution considérable de l'activité radiante ; mais peu à peu l'activité reprend sa valeur primitive au bout d'un temps plus ou moins long suivant les conditions de l'expérience. Un sel qui vient d'être séché émet autant d'émanation qu'un sel identique préparé depuis longtemps et qui a atteint son activité limite.

Un sel de radium qui vient d'être préparé dégage une quantité de chaleur relativement faible. Celle-ci augmente continuellement et tend vers une valeur déterminée qui ne paraît pas encore tout à fait atteinte au bout d'un mois. Si un sel de radium est dissous, et la solution enfermée dans un tube scellé, la quantité de chaleur dégagée par la solution, d'abord faible, tend vers la même limite que pour le sel à l'état solide.

Quand on chauffe longtemps au rouge un sel radifère et qu'on le ramène à la température ambiante, on constate que son activité est moindre qu'avant la chauffe; mais peu à peu le sel reprend spontanément son activité primitive et l'activité limite peut être supérieure à celle que possédait le sel avant la chauffe. Dans les deux cas la diminution temporaire dans l'intensité du rayonnement porte principalement sur les rayons pénétrants.

Un sel de radium qui a été chauffé au rouge a perdu en grande partie la propriété de produire la radioactivité induite, mais pour lui rendre cette propriété, il suffit de le faire passer par l'état dissous.

Si l'on mélange une solution d'une matière inactive avec une solution de radium, et qu'on précipite ensuite la matière ajoutée en séparant le radium avec grand soin, le précipité est actif, mais cette activité disparaît avec le temps. Un corps très divisé tel que le noir de fumée, mélangé à une solution active devient temporairement actif. En précipitant du sulfate de baryte dans une solution d'actinium, M. Debierne a obtenu un produit temporairement actif, mais dont l'activité, bien que passagère, a pu être concentrée par des méthodes de fractionnement analogues à celles au moyen desquelles on concentre le radium.

Lorsque, après avoir mélangé une solution de chlorure de baryum et une solution de chlorure d'uranyle, on précipite le sulfate de baryte, ce sel devient temporairement actif, il peut même être momentanément plus actif que le sel d'uranium, mais il perd son activité avec le temps. Le sel d'uranium extrait de la solution est moins actif qu'auparavant. En multipliant les précipitations successives de

sulfate de baryte dans une même solution active, on peut obtenir des sels d'uranium considérablement affaiblis; tous ces produits reprennent spontanément avec le temps leur activité primitive. La loi de récupération avec le temps de l'activité du sel d'uranium, est la même que la loi de disparition de l'activité du précipité de sulfate de baryum.

Sir W. Crookes et M. Rutherford ont obtenu, l'un avec l'uranium, l'autre avec le thorium, des produits affaiblis; selon la nature des réactifs chimiques, l'activité suivait le précipité ou restait dans la liqueur.

M. Heydweiller (1) avait annoncé que le radium perd avec le temps une petite partie de son poids; ce résultat admis par M. Dorn (2) a été infirmé par M. Forch (3).

Le rayonnement des corps actifs ne communique pas de radioactivité à d'autres corps. Cependant M. Villard a observé que du bismuth exposé à des rayons cathodiques était devenu faiblement actif, MM. Hofmann et Strauss (4) ont préparé un sulfate de plomb retiré de minerais actifs, qui, après avoir perdu son activité temporaire, la reprenait par une exposition à des rayons cathodiques. Enfin, M. Mc. Lennan (5) a obtenu des signes de radioactivité dans certains sels primitivement inactifs et exposés ensuite à l'action de rayons cathodiques ou au rayonnement ultra-violet d'étincelles électriques. Dans ce

---

(1) *Physikalische Zeitschrift*, t. IV, p. 81 (1903).

(2) *Physikalische Zeitschrift*, t. IV, p. 530 (1903).

(3) *Physikalische Zeitschrift*, t. IV, p. 443 (1903).

(4) *Berichte der D. Chem. Gesellschaft*. Bd. XXXIII, s. 3126 (1900); Bd. XXXIV, s. 8, 407, 907, 3033, 3970 (1901).

(5) *Phil. Mag.*, t. III, p. 195 (fév. 1902).

cas, la faible activité temporaire ne s'observe qu'en chauffant et n'a d'action que sur les corps électrisés positivement. Ces phénomènes demandent des vérifications et des études nouvelles avant d'être classés à côté de ceux que nous avons exposés plus haut.

On doit faire une réserve analogue pour les conclusions que Sir W. Crookes a déduites de l'observation d'une phosphorescence scintillante de la blende hexagonale recevant le rayonnement du radium (Voir p. 268). MM. Elster et Geitel (1) ont observé la même scintillation sur un écran de blende hexagonale maintenu à un potentiel négatif de 2000 volts au milieu d'une masse d'air radioactif extrait du sol, ou d'air activé par l'émanation du thorium. Les mêmes auteurs ont ensuite répété l'expérience de Sir W. Crookes avec des substances actives, mais la scintillation ne s'est plus produite quand ils ont substitué à la blende hexagonale une autre matière phosphorescente. On sait, d'autre part, que la blende hexagonale s'altère sous l'influence du rayonnement ; il n'est donc pas encore démontré que la scintillation soit nécessairement le fait d'une intermittence de la radiation plutôt qu'une propriété de l'écran altérable.

Tout récemment (2), Sir W. Huggins et Lady Huggins ont observé la présence des bandes ultraviolettes de l'azote dans le spectre de la lueur phosphorescente spontanée du bromure de radium.

Tels sont les principaux faits d'expérience. Dans ce

---

(1) *Phys. Zeitschr.*, IV, s. 439.

(2) *Proc. Roy. Soc.*, LXXII, p. 196 (17 juillet-5 août 1903).

résumé, on s'est efforcé d'écarter toute considération théorique ou toute hypothèse; nous allons maintenant examiner quelques-unes de ces considérations et de ces hypothèses.

§ 2. — *Considérations théoriques.*

Les considérations théoriques soulevées par l'étude des phénomènes de radioactivité se rapportent à deux problèmes; le premier est relatif à la nature de l'émission, le second consiste dans la recherche des sources auxquelles les corps actifs puisent l'énergie qu'ils dépensent à chaque instant.

Les faits exposés dans les chapitres précédents nous ont conduit à reconnaître quelques-uns des modes de transmission de l'énergie des corps actifs aux corps extérieurs, mais les analogies observées entre diverses parties de l'émission totale et d'autres phénomènes physiques n'ont fait ressortir aucune explication de la cause première de la radioactivité.

I. Nature de l'émission des corps radioactifs. — Examinons d'abord quelles sont les conclusions que l'on peut déduire de l'étude de l'émission; celle-ci constitue le seul phénomène abordable à l'expérimentation, et toutes ses manifestations ne nous sont peut-être pas encore connues.

L'expérience nous montre que dans l'*émission* totale, on doit distinguer deux phénomènes, le *rayonnement* et l'*émanation*.

Le premier se compose lui-même de diverses parties qui sont à peu près complètement identifiées avec les divers rayons observés dans les décharges électriques au travers des gaz raréfiés. Le second ne paraît jusqu'ici avoir d'analogie avec aucun autre phénomène connu.

Rayonnement. — Le rayonnement des corps actifs se manifeste sous trois formes que l'on est convenu de désigner par α, β et γ.

Les rayons α paraissent assimilables aux rayons canaux.

Les rayons β sont identiques à des rayons cathodiques, et les rayons γ se comportent comme des rayons X très pénétrants.

Dans les tubes à gaz raréfiés, les décharges électriques font naître des rayons cathodiques et des rayons canaux, et les rayons cathodiques donnent eux-mêmes naissance à des rayons X. On sait aussi que les rayons X provoquent un rayonnement secondaire formé d'une partie non déviable par un champ magnétique et d'une partie déviable transportant des charges électriques négatives.

L'association des rayons α, β et γ dans le rayonnement des corps actifs n'a donc rien qui doive nous surprendre.

Il convient de remarquer que les rayons γ se rencontrent dans le rayonnement de tous les corps actifs, même lorsque ceux-ci manifestent isolément l'une des espèces de rayons déviables à l'exclusion de l'autre. On les retrouve dans le rayonnement du polonium qui ne contient pas de rayons β, et dans celui de l'uranium qui ne paraît pas émettre de rayons chargés d'électricité positive.

Cette constatation n'est pas contraire à l'existence d'une dépendance mutuelle entre les rayons γ et les rayons α ou

β, mais elle n'est pas suffisante pour nous indiquer si certains rayons donnent naissance aux autres.

L'une des hypothèses les plus vraisemblables consiste à regarder les rayons X et par suite les rayons γ comme des impulsions de l'éther, ne constituant pas des ondes régulières. D'autre part, on verra plus loin que l'une des hypothèses que l'on peut faire sur la radioactivité, est de considérer le phénomène, et en particulier les rayons α et β, comme les effets d'une série d'explosions atomiques. Dans cet ordre d'idées, il semble assez naturel que ces explosions provoquent des perturbations de l'éther ne se succédant pas avec la régularité que l'on rencontre dans les phénomènes lumineux.

La partie du rayonnement dont l'étude a été la plus complète, est la partie β ou partie cathodique. On a vu que l'on rendait compte de ses propriétés, dans leurs moindres détails, en considérant un faisceau cathodique comme constitué par des petits corps transportant des charges électriques négatives. Ces corpuscules, selon l'expression de M. J.-J. Thomson, ou ces électrons, comme les appelle M. Lorentz, ont été considérés comme des parcelles de matière ordinaire dont les masses seraient environ mille fois plus petites que celle de l'atome d'hydrogène.

La théorie « balistique » ou corpusculaire a été féconde par les expériences qu'elle a provoquées. Dans cette théorie, la transmission des rayons cathodiques qui traversent les corps solides en conservant leurs charges électriques, devenait comparable au passage d'un flux de poussières au travers d'un treillage. Les masses les plus faibles et les plus rapides devaient être les plus péné-

trantes, les plus grosses et les plus lentes devaient être les plus absorbables. Les rayons secondaires pouvaient être considérés comme constitués par la matière entraînée ou pulvérisée par les projectiles cathodiques.

La réalité des charges négatives transportées par les rayons cathodiques a été démontrée, tandis que l'existence même des corpuscules est encore en question. Les expériences de M. Kaufmann ont montré que le rapport de la masse attribuée aux corpuscules fictifs, à la charge qu'ils transportent était variable avec la vitesse calculée. D'un autre côté, en s'appuyant sur la théorie de M. Lorentz, M. Abraham a montré qu'une partie au moins de l'inertie d'un électron en mouvement était de nature électro-magnétique et fonction de la vitesse. En appliquant à ses expériences les formules de M. Abraham, M. Kaufmann a cru pouvoir conclure que, dans la limite des erreurs de ses expériences, la masse calculée pour l'électron était entièrement électromagnétique, et l'importance de cette considération fait désirer des expériences plus complètes sur cette question.

Des expériences suffisamment précises manquent également pour les rayons α; on sait seulement qu'en leur appliquant la théorie balistique, les masses calculées sont plus grosses et les vitesses moindres que pour les rayons cathodiques.

Les électrons ne semblent pas devoir être considérés comme répondant à la matière ordinaire sous les états que nous lui connaissons. Sir W. Crookes, l'initiateur de ces idées théoriques, considérait la « *matière radiante* » comme un quatrième état de la matière, et la « matière radiante »,

support des charges transportées, n'est autre que l'électron.

Il résulte de ces diverses considérations que si, par le fait du rayonnement, les corps actifs subissaient une perte de poids, celle-ci paraît devoir être tellement faible qu'elle échapperait à nos moyens de mesure. On a rappelé plus haut qu'aucun changement de poids des corps actifs n'avait pu être constaté avec certitude.

Le rayonnement, en rencontrant les corps ambiants et en pénétrant dans ceux-ci, s'y transforme et provoque des effets calorifiques, chimiques et lumineux.

Une partie du rayonnement peut même être absorbée et transformée sur place, à sa naissance, dans les préparations actives elles-mêmes. La phosphorescence spontanée des sels de radium accompagnée des bandes spectrales de certains gaz, et une partie au moins de la chaleur dégagée peuvent être attribuées à cette absorption.

Émanation. — Les effets de l'émanation ont été très complètement étudiés par M. et Mme Curie et par M. Rutherford. Ce phénomène paraît intimement lié à la présence de la matière.

L'émanation du thorium découverte par M. Rutherford se comporte comme un gaz. L'auteur expliquait la radioactivité qu'elle communique aux corps, et, en particulier, à ceux qui sont électrisés négativement, en supposant que l'émanation produit un dépôt matériel. Cette hypothèse paraît rendre compte de tous les faits, à la condition toutefois d'admettre que le dépôt est en quantité tellement faible que sa présence ne peut être révélée par aucun des procédés applicables à la matière ordinaire.

De leur côté M. et Mme Curie ont montré que l'activité

induite par le radium se transmettait par les gaz, qu'elle ne se produisait pas dans une enceinte où l'on entretenait le vide d'une manière continue, et que l'émanation se diffusait dans les gaz comme le ferait un gaz dans un autre gaz. L'émanation communique superficiellement aux corps des propriétés temporairement identiques à celles de la matière active elle-même.

Il semble qu'on puisse attribuer à l'état de dissociation électrolytique la mise en liberté de la cause de la radioactivité induite car la présence de l'eau et surtout l'état de dissolution dans l'eau favorise la manifestation de l'émanation.

Au contraire, la calcination de certains sels fait disparaître la faculté d'émettre l'émanation, sans altérer l'intensité du rayonnement; cette disparition coïncide avec la disparition des traces d'eau dans les sels. L'émanation reparaît si le sel est dissous puis ramené à l'état solide. On pourrait expliquer la disparition de l'émanation par le fait que la calcination peut provoquer à la surface des particules solides la formation d'une couche vitreuse qui intercepte les échanges gazeux et confine l'émanation à l'intérieur des particules vitrifiées.

Peut-être également faudrait-il attribuer à une constitution moléculaire s'opposant à la diffusion des gaz l'absence d'émanation avec l'uranium et le polonium.

Il convient de rapprocher de ces considérations les phénomènes d'activation obtenus en précipitant des corps inertes dans des solutions actives. Ceux-ci prennent temporairement une activité de même nature que celle du corps actif dissous.

On pourrait penser que, dans ces expériences, l'activation est due à des parcelles de matière radioactive entraînées par la précipitation. Mais comme l'activité disparaît au bout de quelque temps, on serait obligé d'admettre, soit que la matière active disparaît dans l'acte de la radioactivité, et que la quantité entraînée est assez faible pour que sa disparition se fasse assez rapidement et devienne appréciable, soit que la matière entraînée a perdu la propriété d'avoir une émission permanente, et est devenue temporairement active comme l'est l'émanation.

Cette dernière conception s'exprime plus simplement en disant que le précipité a fixé l'émanation mise en liberté par la dissociation électrolytique corrélative de l'acte de la dissolution. L'affaiblissement de l'activité de la matière active dissoute serait dû à cet emprunt. On a vu, du reste, que cet affaiblissement était temporaire et que l'activité se régénérait spontanément avec le temps. Cet affaiblissement et cette récupération se manifestent avec tous les sels actifs dissous, puis ramenés à l'état solide.

J'ai pensé que la récupération d'activité observée dans les divers cas pouvait s'expliquer en admettant que l'émanation produite d'une manière continue par une préparation radioactive, se fixait en partie sur la préparation elle-même. La fixation se ferait, soit sur la matière inerte mélangée à la matière active, soit sur les molécules inactives associées chimiquement aux molécules actives. Les parties ainsi activées participent à l'émission totale, de sorte que, par l'effet de cette « auto-activation », l'activité d'une préparation doit augmenter spontanément

pendant quelque temps à partir du moment où elle a été obtenue.

L'accroissement d'activité doit tendre vers un maximum qui sera atteint lorsque la disparition naturelle de l'activité induite compensera exactement l'activation due à la production continue de l'émanation.

La quantité de chaleur dégagée augmente en même temps que l'intensité du rayonnement, et en même temps que la fixation de l'émanation, soit dans les corps solides, soit dans les dissolutions.

Lorsqu'on dissout une préparation radioactive, l'activité induite des matières mélangées et celle des éléments dissociés se répandent dans la solution d'où elles peuvent être transmises aux gaz ambiants, et lorsqu'on ramène ensuite la préparation à l'état solide, les matières inactives n'ont plus la même activation qu'avant d'avoir été dissoutes.

L'activité du sulfate de baryte précipité dans la solution d'un sel d'uranium peut être temporairement plus grande que l'activité du sel d'uranium, et ce fait montre bien que l'activation n'est pas due à des parcelles d'uranium entraînées mécaniquement.

Il semble y avoir eu dans ce cas concentration sur une petite quantité de matière inerte, de la presque totalité de l'émanation répandue dans la solution.

Un phénomène du même ordre intervient peut-être dans la concentration progressive de l'activité induite par une série de précipitations fractionnées, telle que l'a réalisée M. Debierne.

On peut même pousser plus loin les conséquences de

cette hypothèse et se demander si dans les opérations de fractionnement par cristallisation la masse totale de l'activité répandue dans la solution n'intervient pas pour communiquer aux premiers cristaux déposés une activité permanente supérieure à celle des cristaux déposés ultérieurement dans la solution déjà affaiblie.

On voit combien l'hypothèse qui assimile l'émanation à une matière active se prête facilement à l'interprétation des phénomènes. Dans cet ordre d'idées, pour me guider dans mes recherches, j'avais émis l'hypothèse suivante (1).

Il y aurait dans les corps radioactifs deux sortes de particules de différentes grosseurs, les unes environ mille fois plus petites que les autres; en se séparant, les plus petites emporteraient des charges négatives, et prendraient des vitesses énormes qui leur permettraient de traverser les corps solides, ce seraient les rayons β; les autres, plus grosses, dont les masses seraient de l'ordre de grandeur de celles des ions électrolytiques, seraient animées de vitesses beaucoup moindres; les unes, chargées positivement formeraient des radiations très absorbables, les rayons α; les autres ne traverseraient pas les solides et constitueraient l'émanation, se comportant comme une sorte de gaz qui formerait sur tous les corps, excepté sur ceux qui sont électrisés positivement, un dépôt matériel; on expliquerait ainsi les phénomènes de radioactivité induite, l'identité temporaire du rayonnement et de l'émanation des corps activés et des corps activants,

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIII, p. 979 (9 décembre 1901).

et l'identité de l'induction sur les divers corps solides quelle que soit leur nature.

Ce dépôt de matière serait capable de se diviser à son tour en particules plus petites qui traverseraient le verre, donnant des rayons déviables et non déviables observés avec les substances induites, et ce serait par suite de cette subdivision moléculaire que la radioactivité induite se dissiperait, même au travers d'une enveloppe de verre.

Tout en me laissant guider par cette hypothèse pour l'exécution de diverses expériences décrites dans les chapitres précédents, je n'ai reconnu aucun fait précis de nature à établir que l'émanation fût réellement de la matière dans l'un des états sous lesquels celle-ci se présente habituellement.

M. Rutherford a été conduit de son côté à penser que l'émanation était matérielle; et même il n'a pas hésité à lui attribuer les propriétés des gaz du groupe de l'argon ou de l'hélium.

L'absence de tension de vapeur dans le vide, le fait qu'on n'observe aucune trace des raies spectrales caractéristiques du radium dans les gaz radioactifs extraits des sels de radium, et la disparition totale de l'activité de l'émanation enfermée dans un tube scellé, paraissent contraires à cette manière de voir.

Pour répondre à ces objections on pourrait admettre que dans l'émanation la matière est en quantité trop faible pour que les manifestations, par lesquelles nous caractérisons les corps, soient sensibles. On sait en particulier que les raies du radium n'apparaissent qu'avec des produits contenant une proportion notable de ce corps.

L'opinion que M. Curie (1) a puisée dans ses beaux travaux est : « qu'il n'y a pas actuellement de raisons suffisantes pour admettre l'existence d'une émanation de matière sous sa forme atomique ordinaire ».

M. Curie définit l'émanation comme étant « l'énergie radioactive émise par les corps radioactifs sous la forme spéciale sous laquelle elle est emmagasinée dans les gaz et dans le vide », et il propose la théorie suivante de la radioactivité :

« Le radium n'émet pas par lui-même des rayons de Becquerel, il n'émet que l'émanation. Dans les sels de radium solides l'émanation ne pouvant s'échapper, se transforme sur place en rayonnement de Becquerel. Pour une solution placée dans une enceinte, l'émanation se répand dans l'enceinte et provoque la radioactivité des parois ; le rayonnement est extériorisé. »

Examinant ensuite quel est le support de l'énergie qui constitue l'émanation, M. Curie signale les trois manières de voir suivantes : soit admettre avec M. Rutherford que le radium émet un gaz qui sert à transporter l'émanation, soit attribuer ce rôle au gaz qui existe dans l'espace où elle est répandue, soit supposer que l'émanation n'a pas pour support la matière ordinaire, et qu'il existe des centres de condensation d'énergie situés entre les molécules des gaz et qui peuvent être entraînés avec eux.

M. Debierne a récemment repris et développé l'hypothèse des centres d'énergie ou *ions activants* à l'occasion

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 225 (26 janvier 1903).

d'une étude sur l'activité induite par les sels d'actinium. Cette hypothèse rend compte des différences que l'on observe dans le vide entre la diffusion de l'activation produite par l'actinium, et celle du radium. M. Debierne a montré en outre qu'un champ magnétique agit sur la cause de l'activation et il attribue cette cause à un rayonnement nouveau qui aurait la propriété de rendre temporairement actifs les corps qui le reçoivent.

Il faut attendre de nouvelles expériences avant de pouvoir se prononcer sur la valeur de cette dernière hypothèse.

Ainsi l'étude de l'émission des corps radioactifs, émission se faisant, soit par rayonnement, soit par émanation, nous conduit à concevoir la matière dans un état différent de l'état atomique ordinaire. Les électrons, tels que les a imaginés M. Lorentz dans sa théorie électro-magnétique de la lumière, paraissent répondre à cette conception, et ce rapprochement établit un lien entre les manifestations de la radioactivité et les causes qui donnent naissance aux phénomènes électriques, électro-magnétiques et lumineux.

II. — *Hypothèses relatives aux sources de l'énergie dépensée.* — Les premières observations qui permirent de découvrir le rayonnement de l'Uranium, mirent en évidence la spontanéité et la permanence de l'émission.

Ces deux propriétés inattendues, et qui, du reste, ne sont pas nécessairement corrélatives l'une de l'autre, ont posé dès l'origine de ces études le problème de la recherche des sources de l'énergie dissipée.

La première idée qui se présenta fut de rattacher le phénomène nouveau à une transformation d'énergie de l'ordre des phénomènes de phosphorescence.

Les anomalies décrites dans le chapitre II étaient de nature à appuyer cette manière de voir, mais bientôt les expériences démontrèrent l'inefficacité de toutes les causes excitatrices connues pour modifier l'intensité du rayonnement; la spontanéité et la permanence apparurent alors comme caractéristiques du rayonnement de l'uranium. Ces propriétés constatées depuis avec les divers corps doués d'une radioactivité propre constituent l'un des caractères les plus importants du phénomène; elles dérivent de son essence même et apparaissent comme l'effet, soit d'une propriété nouvelle de la matière, soit d'une source d'énergie dont l'existence aurait échappé jusqu'ici aux expérimentateurs.

Cette considération avait frappé M. et Mme Curie dès l'origine de leurs travaux faisant suite à mes premières recherches, et, dans la première note publiée par Mme Curie se trouve énoncée l'hypothèse suivante :

« On pourrait imaginer que tout l'espace est constamment traversé par des rayons analogues aux rayons de Röntgen, mais beaucoup plus pénétrants et ne pouvant être absorbés que par certains éléments à gros poids atomiques tels que l'uranium et le thorium. »

Le fait que le radium se classe à côté des corps dont le poids atomique est élevé, n'est pas contraire à cette conception. L'énergie serait empruntée à un rayonnement cosmique ou solaire, et les corps actifs la transformeraient comme les corps matériels transforment les

rayons X en rayons secondaires, ou comme ils transforment la lumière ultra-violette en rayons cathodiques.

La transformation pourrait s'appliquer soit à la totalité soit à une partie de l'émission, et l'autre partie serait alors un effet secondaire du rayonnement lui-même.

Rien n'est venu jusqu'ici ni confirmer ni infirmer cette hypothèse. L'activité des corps radioactifs n'a pas paru subir de modification lorsqu'on les a transportés au fond d'une mine profonde, ou au milieu d'une masse importante de minerai radioactif, qui, conformément au principe de Kirchhoff, eût pu absorber le rayonnement excitateur.

Une autre hypothèse consiste à supposer qu'en l'absence de toute cause excitatrice connue l'énergie émise pourrait être empruntée à l'énergie qui serait mise en liberté par une destruction moléculaire de la matière elle-même. Cette destruction, qui pourrait mettre en jeu des quantités d'énergie considérables, aurait lieu, soit spontanément en vertu d'une propriété physique nouvelle, soit sous l'influence d'une intervention extérieure.

Le phénomène serait une sorte d'évaporation ou de pulvérisation comparable à la production des odeurs qui sont émises par certains corps sans que l'on puisse, même au bout d'un temps assez long, constater une diminution appréciable de leurs poids. L'émanation serait comparable à un gaz transportant une odeur.

Cette idée était de celles qui semblaient compatibles avec l'extrême ténuité des corpuscules auxquels la théorie balistique attribue le rayonnement cathodique, et je l'avais accueillie avec faveur au début de mes recherches.

Je comparais alors les corps actifs à des réservoirs contenant une quantité considérable d'énergie dans un état de disponibilité latente, et qui dépenseraient peu à peu leur réserve. Si la réserve est très faible le phénomène est temporaire; si elle est considérable l'émission nous semble être permanente.

Parmi les corps dans lesquels on peut accumuler de l'énergie d'une manière permanente on peut citer le fer et l'acier qui s'aimantent, et peuvent servir de transformateurs d'énergie sans perdre leur aimantation, mais le phénomène est différent de celui qui nous occupe. Les corps qui deviennent phosphorescents quand on les échauffe et qui sont appelés aujourd'hui thermo-lumineseents emmagasinent l'énergie lumineuse, peut-être sous forme de combinaison chimique, et la conservent pendant un temps indéfini jusqu'au moment où une élévation de température fait émettre cette énergie sous forme lumineuse. Certaines combinaisons chimiques formées avec absorption de chaleur conservent l'énergie qui leur a été fournie et la restituent au moment de leur décomposition.

On peut donc rechercher si la source qui fournit l'énergie dépensée dans les corps actifs n'est pas une dislocation continuelle des molécules ou même des atomes. Il n'est pas contraire à ce que l'on connaît de supposer que l'énergie emmagasinée par l'action qui relie entre elles les particules les plus ténues de la matière pour constituer l'atome soit considérable.

L'atome des corps actifs ne serait donc pas invariable et on serait conduit à admettre qu'il se détruit par une sorte d'explosion. Les débris pourraient être, en partie de

la matière inerte, et en partie des électrons ou des groupements d'électrons qui constitueraient les divers rayonnements α et β, et communiqueraient des ébranlements à l'éther (rayons γ); les corpuscules resteraient répandus dans la matière ou dans l'espace. Dans cet ordre d'idées l'émanation pourrait être regardée comme formée par des groupements d'électrons transportés par la matière gazeuse.

Nous avons déjà vu que l'hypothèse de transformations chimiques altérant la molécule s'était présentée à divers observateurs. Les corps hypothétiques qu'ils ont imaginés pour rendre compte des faits d'expérience, l'Ur.X, de Sir. W. Crookes, le Th.X et le Ra.X de M. Rutherford peuvent être considérés comme des noms différents donnés à l'émanation de l'uranium, du thorium et du radium.

M. Rutherford imagine même que la matière passe par une série de transformations moléculaires successives dont le terme serait une transformation *subatomique*.

Cette conception n'est pas essentiellement différente de celle qui a été exposée plus haut, et qui aboutit à une pulvérisation de l'atome.

Enfin je dois mentionner qu'après avoir observé un dégagement continu de chaleur au sein d'une masse de chlorure de radium, M. Curie a été également conduit à invoquer l'hypothèse d'une modification très lente de l'atome de radium, tout en faisant remarquer que le dégagement de chaleur pourrait encore s'expliquer en supposant que le radium utilise une énergie extérieure de nature inconnue.

Le fait qu'aucun corps radioactif n'a été trouvé dans un minerai qui ne contenait pas de l'uranium ou du tho-

rium, et la similitude entre les propriétés chimiques des corps actifs et celles d'autres corps beaucoup plus répandus, ont encore suggéré l'idée de la possibilité d'une transformation de la matière inerte en matière active sous l'influence d'une cause extérieure. Une telle transformation n'apparaîtrait pas comme étant plus invraisemblable que ne l'est la transformation de la matière inerte en matière aimantée. Cependant une telle hypothèse, qui conduit à admettre une transmutation entre les éléments, est contraire à toutes les lois physiques et chimiques établies.

Si l'énergie émise est empruntée à la transformation de la matière active, l'activité doit s'épuiser.

Une participation de la matière inerte à la formation de la matière active augmenterait la réserve de radioactivité dans la nature et reculerait l'échéance de sa disparition finale. Si la transformation est excessivement faible par rapport aux masses matérielles que nous pouvons mesurer, et très lente par rapport à la durée des phénomènes au milieu desquels nous vivons, l'émission doit nous paraître permanente.

Cependant une variation continue dont la durée serait comparable à celle des phénomènes géologiques devrait être appréciable, et l'on est en droit de penser que, depuis l'époque de leur formation dans la croûte terrestre, ces corps instables eussent dû disparaître si aucune cause extérieure ne tendait à les reconstituer.

L'hypothèse d'une destruction de l'atome s'est présentée assez naturellement pour justifier l'émission de matière corpusculaire ; mais l'hypothèse inverse, proposée

par M. Filippo Re (1), n'est pas moins intéressante.

Après avoir émis l'idée que les atomes matériels seraient formés de corpuscules dont le groupement obéit aux lois de la gravitation, et avoir constaté que l'énergie dépensée pour réaliser ce groupement a dû être énorme si l'on en juge par l'impossibilité où nous sommes de la détruire, M. F. Re compare les atomes inertes à des soleils éteints, arrivés à un état stable, et les atomes radioactifs à des soleils en activité, subissant une condensation progressive qui dégage l'énergie observée.

On doit rapprocher de cette conception l'hypothèse émise il y a quelques années par M. J. Perrin (2) et dans laquelle l'auteur assimile la constitution des atomes à celle d'une sorte de système solaire réduit. En appliquant à un pareil système les lois de la gravitation, on trouve que les mouvements périodiques des corpuscules sont de l'ordre de fréquence des mouvements lumineux. M. Perrin assimilait les atomes radioactifs à des systèmes dont les planètes les plus éloignées pourraient échapper à l'attraction centrale.

L'hypothèse de M. F. Re peut être prise en considération au même titre que l'hypothèse inverse. Elle partage avec celle de M. Perrin l'intérêt puissant qui s'attache aux tentatives faites pour ramener à des lois communes l'infiniment petit de l'atome et l'infiniment grand de l'Univers.

---

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 1393 (8 juin 1903).

(2) *Revue scientifique*, 13 avril 1901.

Nous avons été amenés à examiner deux groupes d'hypothèses entre lesquelles aucune expérience ne vient nous imposer un choix.

1° La matière se transforme, soit spontanément soit sous l'influence d'une cause extérieure; si l'atome se détruit, l'énergie libérée a été empruntée antérieurement à des sources extérieures; si l'atome se condense, l'énergie dégagée est le résultat de la contraction actuelle.

2° L'énergie dépensée est empruntée actuellement à des sources extérieures, et elle est transformée à chaque instant par la matière.

Dans ces diverses hypothèses la question de la permanence dans l'intensité de la radioactivité n'est qu'une des formes sous lesquelles se présente la question générale de la permanence des causes dans l'Univers.

Peut-être celle-ci constitue-t-elle seulement une apparence qui réside dans l'ordre de grandeur de la durée du temps que peut concevoir notre raison; nous observerions alors l'effet d'une cause dont l'évolution lente et continue nous donnerait l'illusion de la permanence.

Août 1903.

BIBLIOGRAPHIE

1. — *Sur les radiations émises par phosphorescence.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXII, p. 420 (24 février 1896).

2. — *Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXII, p. 501 (2 mars 1896).

3. — *Sur quelques propriétés nouvelles des radiations invisibles. émises par divers corps phosphorescents.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXII, p. 559 (9 mars 1896).

4. — *Sur les radiations invisibles émises par les sels d'uranium.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXII, p. 689 (23 mars 1896).

5. — *Sur les propriétés différentes des radiations invisibles émises par les sels d'uranium, et du rayonnement de la paroi anticathodique d'un tube de Crookes.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXII, p. 762 (30 mars 1896).

6. — *Émission de radiations nouvelles par l'uranium métallique.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXII, p. 1086 (18 mai 1896).

7. — *Sur diverses propriétés des rayons uraniques.* H. Becquerel, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIII, p. 855 (23 novembre 1896).

8. — *Recherches sur les rayons uraniques.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIV, p. 438 (1er mars 1897).

9. — *On Electric Equilibrium betwen Uranium and an insulated Metal in its Neighbourhood.* By Lord Kelvin, J. Carruthers Beattie, and M. Smoluchowski de Smolan (1er mars 1897). *Nature* (11 mars 1897). *Phil. Mag.*, t. XLV, p. 277 (1898); id., XLVI, p. 82.

10. — *Sur la loi de la décharge dans l'air de l'uranium électrisé.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIV, p. 800 (12 avril 1897).

11. — *La thermo-luminescence provoquée par les rayons de Röntgen et les rayons Becquerel.* J.-J. Borgman. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIV, p. 895 (26 avril 1897).

12. — *Ueber Luminescenz.* W. Arnold. *Annalen der Physik und Chemie.* Bd. LXI, s. 324 (1° Juni 1897).

13. — *Sulla proprietà scaricatrice prodotta nei gaz dall' Uraninite.* E. Villari. *R. Acad. dell. Scienze Fisiche e Matematiche di Napoli.* F. 7, Luglio 1897.

14. — *Ueber die von den Thorverbindungen und einigen anderen Substanzen ausgehende Strahlung.* G. C. Schmidt. *Verh. Phys. Ges.*, Berlin, XVII, 14 fév. 1898 et *Ann. der Phys. und Chem.*, Bd. LXV, s. 141, 1898.

15. — *Rayons émis par les composés de l'uranium et du thorium.* Mme Sklodowska Curie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXVI, p. 1101 (12 avril 1898).

16. — *Sur une substance nouvelle radioactive contenue dans la Pechblende.* M. et Mme P. Curie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXVII, p. 175 (18 juillet 1898).

17. — *Versuche an Becquerelstrahlen.* J. Elster und H. Geitel. *Ann. der Phys. und Chem.*, Bd. LXVI, s. 735 (26 sept. 1898).

18. — *Sur une nouvelle substance fortement radioactive contenue dans la Pechblende.* M. et Mme P. Curie et M. Bémont. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXVII, p. 1215 (26 déc. 1898).

19. — *Sur le spectre d'une substance radioactive.* E. Demarçay. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXVII, p. 1218 (26 déc. 1898).

20. — *Uranium Radiation and the Electrical Conduction produced by it.* E. Rutherford. *Cavendish Laboratory* (1er sept. 1898). *Phil. Mag.*, XLVII, n° 284, 5e série, p. 109 (janvier 1899).

21. — *Sur la source de l'énergie dans les corps radioactifs.* Sir W. Crookes. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXVIII, p. 176 (16 janvier 1899).

22. — *Note sur quelques propriétés du rayonnement de l'uranium et des corps radioactifs.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXVIII, p. 771 (27 mars 1899).

23. — *Ueber eine radioactive Substanz.* De Haen. *Ann. der Phys. und Chem.*, II, Bd. LXVIII, s. 902, 1899 (14 Juli. 1899).

24. — *Einiges ueber das Verhalten des radioactiven Baryts und ueber Polonium.* F. Giesel (2 August. 1899). *Ann. der Phys. und Chemie.* Bd. LXIX, s. 91, 1899.

25. — *Weitere Versuche an Becquerelstrahlen.* J. Elster und H. Geitel, *Ann. der Phys. und Chemie.* Bd. LXIX, s. 83 (5 August. 1899).

26. — *Beitrage zur Kentniss der Becquerelstrahlen.* O. Behrendsen. *Ann. der Phys. und Chemie.* Bd. LXIX, s. 120 (10 August. 1899).

27. — *Thorium Radiation.* R. B. Owens. *Phil. Mag.*, V, XLVIII, p. 359 (Oct. 1899).

28. — *Sur une nouvelle matière radioactive.* A. Debierne. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIX, p. 593 (16 oct. 1899).

29. — *Ueber die Einvirkung von Becquerelstrahlen auf elektrische*

Funkel und Büschel. J. Elster und H. Geitel. *Ann. der Phys. und Chemie.* Bd. LXIX. s. 673 (28 oct. 1899).

30. — *Ueber die Ablenkbarkeit der Becquerelstrahlen im magnetischen Felde.* F. Giesel (31 oct. 1899). *Ann. der Phys. und Chemie.* Bd. LXIX. s. 834, 1899.

31. — *Sur la radioactivité provoquée par les rayons de Becquerel.* M. et Mme P. Curie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIX, p. 714 (6 novembre 1899).

32. — *Sur le spectre du radium.* E. Demarçay. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIX, p. 716 (6 nov. 1899).

33 — *Sur le poids atomique du métal dans le chlorure de baryum radifère.* Mme S. Curie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIX, p. 760 (13 novembre 1899).

34. — *Effets chimiques produits par les rayons de Becquerel.* M. et Mme P. Curie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIX, p. 823 (20 novembre 1899).

35. — *Ueber das Verhalten von Radium und Polonium in magnetischen Felde.* Stefan Meyer und Egon. R. von Schweidler. *Physikalische Zeitschrift*, I, s. 90 (25 novembre 1899) et s. 113 (2 décembre 1899).

36. — *Recherches sur les phénomènes de phosphorescence produits par le rayonnement du radium.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIX, p. 912 (4 déc. 1899).

37. — *Influence d'un champ magnétique sur le rayonnement des corps radioactifs.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t, CXXIX, p. 996 (11 déc. 1899).

38. — *Sur le rayonnement des corps radioactifs* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIX, p. 1205 (26 décembre 1899).

39. — *Radioactivity produced in substances by the action of Thorium compounds.* E. Rutherford (sept.-nov. 1899). *Phil. Mag.*, t. XLIX, p. 1 (janv. et fév. 1900).

40. — *Action du champ magnétique sur les rayons de Becquerel*,

Rayons déviés et non déviés. P. Curie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXX, p. 73 (8 janv. 1900).

41. — *Sur la pénétration des rayons de Becquerel non déviables par le champ magnétique.* Mme S. Curie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXX, p. 76 (8 janv. 1900).

42. — *Versuche ueber Sekundärstrahlen und Radiumstrahlen.* E. Dorn. *Abh. der Naturf. Ges. zu Halle* (20 janv. 1900).

43. — *Contribution à l'étude du rayonnement du radium.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXX, p. 206 (29 janv. 1900).

44. — *Sur la dispersion du rayonnement du radium dans un champ magnétique.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences.,* t. CXXX, p. 372 (12 février 1900).

45. — *Radioactivity of Uranium.* S. W. Crookes. *Proc. Roy. Soc.,* Vol. LXVI, p. 409 (3-10 mars 1900). — *Chem. News,* LXXXI, 253-269, 1900.

46. — *Sur la charge électrique des rayons déviables du radium,* M. et Mme P. Curie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences.* t. CXXX, p. 647 (5 mars 1900).

47. — *Fluorescence de certains composés métalliques soumis aux rayons Röntgen et Becquerel.* P. Bary. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXX, p. 776 (19 mars 1900).

48. — *Ueber Radium- und Poloniumstrahlung.* Dr Stefan Meyer und Egon R. von Schweidler, *Sitzungsberichte der K. Akad. der Wiss. in Wien. math. naturwiss. Classe.* IX. Abh. II. a März. 1900. s. 92. — *Phys. Zeitschr.,* I. 200.

49. — *Elektrostatische Ablenkung der Radiumstrahlen.* E. Dorn. *Abh. der Naturf. Ges. zu Halle* (11 et 26 mars 1900).

50. — *Déviation du rayonnement du radium dans un champ électrique.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXX, p. 809 (26 mars 1900).

51. — *Ueber die von den radioactiven Substanzen ausgesandte Emanation.* E. Dorn. *Abh. der Naturf. Ges. zu Halle,* 1900.

52. — *Sur un nouvel élément radioactif : l'actinium.* A. Debierne. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 906 (2 avril 1900).

53. — *Note sur la transmission du rayonnement du radium au travers des corps.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 979 (9 avril 1900).

54. — *Sur la réflexion et la réfraction des rayons cathodiques et des rayons déviables du radium.* E. Villard. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 1010 (9 avril 1900).

55. — *Électrisation négative des rayons secondaires produits au moyen des rayons de Röntgen.* P. Curie et G. Sagnac. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 1013 (9 avril 1900).

56. — *Sur les rayons du radium.* E. Dorn. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 1126 (23 avril 1900).

57. — *Sur la transparence de l'aluminium pour le rayonnement du radium.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 1154 (30 avril 1900).

58. — *Sur le rayonnement du radium.* E. Villard. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 1178 (30 avril 1900).

59. — *Radioactivity of uranium.* Sir W. Crookes. *Proc. Roy. Soc.* (10 may 1900).

60. — *Ueber radioactives baryum.* (*Vorläufige Notiz.*) Bela von Langyel (2 avril 1900). *Berichte der D. chem. Ges.*, s. 1237 (Mai 1900).

61. — *Das Verhalten des Radiums bei tiefer Temperatur.* O. Behrendsen. *Ann. der Phys.* Bd. I, p. 335 (5 mai 1900).

62. — *Note sur le rayonnement de l'uranium.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXX, p. 1583 (11 juin 1900).

63. — *Ueber das Spectrum des Radium.* C. Runge. *Ann. der Phys.* Bd. II, s. 742 (11 juin 1900).

64. — *Energy of Röntgen and Becquerel Rays and the energy required to produce an ion in gases.* E. Rutherford and R. K. Mc. Clung. *Phil. Trans.* series A, vol. CXCVI, p. 25 (21 juin 1900). *Phys. Zeitschr.*, II, s. 53.

65. — *Ueber radioactive Substanzen.* Sack. *Chemiker Zeitung*, n° 61, s. 650 (6 juillet 1900).

66. — *Sur le rayonnement de l'uranium.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXI, p. 137 (16 juillet 1900).

67. — *Sur du baryum radioactif artificiel.* A. Debierne. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXI, p. 333 (30 juillet 1900).

68. — *Sur le poids atomique du baryum radifère.* Mme S. Curie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXI, p. 382 (6 août 1900).

69. — *Sur le rayonnement de l'uranium et sur diverses propriétés physiques du rayonnement des corps radioactifs.* H. Becquerel. *Rapports présentés au Congrès International de Physique.* Paris, 1900, III, p. 47.

70. — *Les nouvelles substances radioactives et les rayons qu'elles émettent.* P. Curie et Mme S. Curie. *Rapports présentés au Congrès International de Physique.* Paris, 1900, III, p. 79.

71. — *Radioactive Blei und radioactive seltene Erden.* K. A. Hofmann und E. Strauss. *Berichte der D. Chem. Gesellschaft.* Bd. XXXIII, s. 3126 (1er novembre 1900).

72. — *Ueber radioactive Stoffe.* F. Giesel. *Berichte der D. Chem. Gesellschaft.* Bd. XXXIII, s. 3569 (7 décembre 1900).

73. — *Ueber die Spektra von Radium und Polonium.* G. Berndt, *Phys. Zeitschr.*, II, s. 181 (7 décembre 1900).

74. — *Ueber das radioactive Blei.* Karl A. Hofmann und Eduard Strauss. *Berichte der D. Chem. Gesellschaft.* Bd. XXXIV. s. 8 (8 décembre 1900).

75. — *Emanations from radioactive substances.* E. Rutherford, *Nature*, LXIV, 157, 1900.

76. — *An experimental study of radioactive substances.* H. C. Bolton. *Journ. Am. Chem. Soc.*, XXII, 596, 1900.

77. — *On the behaviour of Becquerel and Röntgen Rays in a magnetic field.* R. J. Strutt. *Proc. Roy. Soc.*, LXVI, 75. *Chem. News*, LXXXI, 61, 1900.

78. — *Ueber einige Versuche mit Becquerel und Röntgen Strahlen.* F. Himstedt. *Ann. der Phys.* Bd. IV., 537 (7 janvier 1901).

79. — *Thermo-luminescenz durch Radiumstrahlen.* E. Wiedemann. *Phys. Zeitschr.*, II, 269, 1901.

80. — *Ueber die Einwirkung der Becquerel-und Röntgenstrahlen auf das Auge.* F. Himstedt and W. A. Nagel. *Ann. der. Phys.* Bd. IV, s. 537 (7 janvier 1901).

81. — *Ueber die Einwirkung von Kathodenstrahlen auf radioactive Substanzen.* — K. A. Hofmann, A. Korn und E. Strauss. *Berichte der D. Chem. Gesellschaft.* Bd. XXXIV, s. 407 (5 février 1901).

82. — *Sur la radioactivité secondaire des métaux.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXXII, p. 371 (18 février 1901).

83. — *On the conductivity of gases under the Becquerel Rays.* J. Strutt. *Phil. Trans.*, series A, vol. CXCVI. A. 284, p. 507, 1901 (21 février 1901).

84. — *The radioactivity of Matter.* H. Becquerel. *Nature,* LXIII, 396 (21 février 1901).

85. — *Sur la radioactivité induite provoquée par les sels de radium.* P. Curie et A. Debierne. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXII, p. 548 (4 mars 1901).

86. — *Sur la radioactivité secondaire.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXXII, p. 734 (25 mars 1901).

87. — *Sur la radioactivité induite et les gaz activés par le radium.* P. Curie et A. Debierne. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXXII, p. 768 (25 mars 1901).

88. — *Ueber das radioactive Blei.* K. A. Hofmann und Eduard Strauss. *Berichte der Deut. Chem. Gesellschaft.* Bd. XXXIV, s. 907. (26 märz 1901).

89. — *Action des rayons du radium sur le sélénium.* E. Bloch. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXXII, p. 914 (15 avril 1901).

90. — *The New Gaz from Radium.* E. Rutherford and Miss H. T. Brooks. *Trans. of the Roy. Soc. of Canada,* vol. VII, sec. III, p. 21 (23 mai 1901).

91. — *Sur l'analyse magnétique du rayonnement du radium et du rayonnement secondaire provoqué par ces rayons.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXXII, p. 1286 (3 juin 1901).

92. — *Action physiologique des rayons du radium.* H. Becquerel et P. Curie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXXII, p. 1289 (3 juin 1901).

93. — *Ueber eine fernere Analogie in dem elektrischen Verhalten der naturlichen und der durch Becquerelstrahlen abnormleitend gemachten Luft.* J. Elster und H. Geitel. *Physikalische Zeitschrift,* II, 590 (1901).

94. — *Methode zur exacten Bestimmung von Ladung und Geschwindigkeit von Becquerelstrahlen.* W. Kaufmann. *Phys. Zeitschr.,* II, s. 602 (28 juin 1901).

95. — *Sur quelques observations faites avec l'uranium à de très basses températures.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXXIII, p. 199 (22 juillet 1901).

96. — *Sur la radioactivité des sels de radium.* P. Curie et A. Debierne. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* t. CXXXIII, p. 276 (29 juillet 1901).

97. — *Ueber das radioactive Blei.* — K. A. Hofmann und Eduard Strauss. *Berichte der Deutschen Chem. Gesellschaft.* Bd. XXXIV, s. 3033 (12 Aug. 1901).

98. — *Ein einfaches und empfindliches Quadranten-electrometer.* Dolezalech. *Verh. Phys. Ges. Berlin,* II, 3.18, 1901.

99. — *Ueber die durch atmophärische Luft induzierte Radioaktivität.* H. Geitel. *Physikalische Zeitschrift*, III, n° 4, p. 76 (8 oct. 1901).

100. — *Essais sur quelques réactions chimiques déterminées par le radium.* M. Berthelot. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIII, p. 659 (28 octobre 1901).

101. — *Sur quelques effets chimiques produits par le rayonnement du radium.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIII, p. 709 (4 novembre 1901).

102. — *Ueber radioactive Stoffe.* Giesel. *Berichte der Deutschen. Chem. Ges.* Bd. XXXIV, n° 560, p. 3772 (7 nov. 1901).

103. — *Die magnetische und electrische Ablenkbarkeit der Becquerelstrahlen, und die scheinbare Masse der Elektronen.* W. Kaufmann. *Nachr. der K. Ges. der Wiss. zu Göttingen. Math. Phys. Klasse*, Heft. 2 (8 novembre 1901).

104. — *Ueber radioactive Stoffe.* K. A. Hofmann und E. Strauss. *Berichte der D. Chem. Gesellschaft.* Bd. XXXIV. s. 3970 (27 nov. 1901).

105. — *Sur la radioactivité induite provoquée par les sels de radium.* P. Curie et A. Debierne. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIII, p. 931 (2 décembre 1901).

106. — *Influence des substances radioactives sur la luminescence des gaz.* A. De Hemptinne. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIII, p. 934 (2 décembre 1901).

107. — *Sur la radioactivité de l'uranium.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIII, p. 977 (9 décembre 1901).

108. — *Sur l'existence de rayons qui subissent la réflexion dans le rayonnement émis par un mélange de chlorures de radium et de baryum.* Th. Tommasina. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIII, p. 1299 (30 décembre 1901).

109. — *Die Bedeutung der Becquerelstrahlen in der Chemie.* Baur. *Naturw. Rundschau*, XVI, 338. *Beiblätter, Ann. Phys. Chem.*, XXV, 1027, 1901.

110. — *Radioactivity and atomic weight.* MARTIN. *Chem. News.*, LXXXIII, 130, 1901.

111. — *Transparency of Metals and other Substances to Radium Rays.* T. MIZUNO. *Electrician.* London, XLVI, 399, 1901.

112. — *Ueber den Einfluss dissociirender Strahlen auf organisirte Substanzen, inbesondere ueber die bakterienschadigende Wirkung der Becquerelstrahlen.* F. ASCHKINASS und W. CASPARI. *Arch. für die Ges. Physiologie*, Bd. 86, s. 603. Bonn, 1901. *Beiblätter. Ann. Phys. Chem.*, XXVI, s. 425.

113. — *I Raggi Y.* M. BUFFA. *Rivista di Fisica Matematica et Scienze Naturali* (Pavia), 1900. — *Bull. de l'Ass. des ing. électriciens de l'Institut Montefiore* (Liège, 1901).

114. — *An Investigation of the radioactive emanation produced by thorium compounds.* E. RUTHERFORD and F. SODDY. *Proc. Chem. Soc.*, n° 245 (16 janv. 1902).

115. — *Sur les corps radioactifs.* M. et Mme P. CURIE. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIV, p. 85 (13 janv. 1902).

116. — *Ueber radioactives Blei.* F. GIESEL. *Berichte der D. Chem. Ges.*, Bd. XXXV, n° 1, p. 102 (18 janv. 1902).

117. — *Ueber radioactives Thor.* HOFMANN und F. ZERBAN. *Berichte der D. Chem. Ges.*, Bd. XXXV, n° 2, s. 531, 1902.

118. — *Uebertragung erregter Radioactivität.* E. RUTHERFORD. *Physikalische Zeitschrift*, III, n° 10, s. 210 (22 janv. 1902).

119. — *Ueber radioactive Substanzen.* F. HENNING. *Ann. der Phys.*, IV, n° 37, s. 562.

120. — *Sur quelques propriétés du rayonnement des corps radioactifs.* H. BECQUEREL *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIV, p. 208 (27 janv. 1902).

121. — *On a Kind of Radioactivity imparted to certain Salts by Cathode Rays.* J. C. MC. LENNAN. *Phil. Mag.*, t. III, p. 195 (février 1902).

122. — *Vergleichende Messungen des elektrischen Potentiales mittels der Flamme und eines aus radioactiver Substanz bestehen-*

den Collectors. F. Henning. *Ann. der Phys.*, IV, Bd. VII, s. 893 (12 fév. 1902).

123. — *Conductibilité des diélectriques liquides sous l'influence des rayons du radium et des rayons de Röntgen.* P. Curie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIV, p. 420 (17 février 1902).

124. — *Recherches sur la radioactivité induite par l'air atmosphérique.* J. Elster et H. Geitel. *Arch. des Sc. Phys. et Nat.*, fév. 1902. Genève.

125. — *La radioactivité de la matière.* H. Becquerel. *Royal Institution*, 7 march 1902.

126. — *On excited Radioactivity.* R. M. Stewart. *Trans. of Roy. Soc. of Canada.* VIII. Sec. III, p. 97 (27 may 1902).

127. — *Ueber radioactive Wismuth (Polonium).* W. Markwald. *Berichte der D. Chem. Ges.* XXXV. Heft 12. 2285. *Verh. der D. Physikal. Ges.* IV, 12 (27 juin 1902).

128. — *On the Comparison of the Radiations from Radioactive. Substances.* E. Rutherford and Miss H. T. Brooks. *Phil. Mag.*, t. IV, p. 1 (juillet 1902).

129. — *Sehr durchdringende Strahlen von radioaktiven Substanzen.* E. Rutherford (9 Juli. 1902). *Phys. Zeitschr.*, III, s. 517).

130. — *Sur le poids atomique du radium.* Mme S. Curie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXV, p. 161 (21 juillet 1902).

131. — *Ueber die elektromagnetische Masse des Elektrons.* W. Kaufmann. *Nach. der K. Ges. der Wiss. zu Göttingen Math. Phys. Kl.*, 1902, Heft 5 (26 Juli. 1902). — *Phys. Zeischrift*, IV, s. 54.

132. — *Prinzipien der Dynamik des Elektrons.* M. Abraham. *Physikalische Zeitschrift*, IV, s. 57. *Ann. der Phys.* Bd. X, s. 105.

133. — *Ueber die radioactive in Uranpecherz vorkommenden*

flüchtige Substanz. Behrendsen. *Phys. Zeitschr.*, III, 572, 1902 (29 juli. 1902).

134. — *On deviable rays of Radioactive Substances.* E. Rutherford and M. A. G. Grier. *Phil. Mag.*, t, IV, p. 315 (sept. 1902).

135. — *Ueber die Radioactivität der Erdboden enthaltenden Luft.* J. Elster et H. Geitel. *Physikalische Zeitschrift*, III, n° 24, s. 574 (3 septembre 1902).

136. — *On the cause and nature of Radioactivity.* Part I. E. Rutherford and M. F. Soddy. *Phil. Mag.*, t. IV, p. 370 (septembre 1902).

137. — *Experiments on Induced-Radioactivity in Air, and on the Electrical Conductivity produced in gases when they pass through Water.* J. J. Thomson. *Phil. Mag.*, t. IV, p. 352 (septembre 1902).

138. — *Ueber Radium bromid und sein Flammenspectrum.* F. Giesel. *Phys. Zeitschrift*, III, n° 24, s. 578 (9 septembre 1902).

139. — *Ueber den Einfluss von Becquerelstrahlen und elektrostatischen Felden auf die Funkenentladung.* Mathias Cantor. *Ann. der Phys.*, IV, F. Bd. IX, s. 452 (18 septembre 1902).

140. — *Notiz ueber die photoelektrische Wirksamkeit der durch Becquerelstrahlen gefärbten Salze.* J. Elster und H. Geitel. *Phys. Zeitschr.*, IV. s. 113 (13 Oktober 1902).

141. — *Zeitliche Gewichtsänderungen radioactiver Substanz.* A. Heydweiller. *Physikalische Zeitschrift*, IV, n° 2, s. 81 (20 Oktober 1902).

142. — *Ueber transportable Apparate zur Bestimmung der Radioactivität der naturlichen Luft.* J. Elster und H. Geitel. *Phys. Zeitschr*, IV, s. 138 (22 Oktober 1902).

143. — *Further experiments on radioactivity from Rain.* C. T. R. Wilson. *Proc. Phil. Soc. Camb.*, XII, 17 (27 oct. 1902).

144. — *On the cause and nature of Radioactivity.* Part. II, E. Rutherford and M. F. Soddy. *Phil. Mag.*, t. IV, p. 569 (novembre 1902).

145. — *Ueber die dem Erdboden entstammende radioactive Emanation.* H. Ebert und P. Ewers. *Phys. Zeitschr.*, IV, s. 162 (14 nov. 1902).

146. — *Sur la constante de temps caractéristique de la disparition de la radioactivité induite par le radium dans une enceinte fermée.* P. Curie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXV, p. 857 (17 nov. 1902).

147. — *On Excited Radioactivity and Ionization of the Atmosphere.* E. Rutherford and M. S. J. Allen. *Phil. Mag.*, t. IV, p. 701 (décembre 1902).

148. — *Induced Radioactivity excited in air at the foot of Waterfalls* Mc. Lennan. — *Some experiments on the electrical conductivity of atmospheric air.* Mc. Lennan and F. Burton. *University of Toronto Studies* (1903) (déc. 1902). — *Phys. Review*, vol. XVI, nos 3 et 4, 1903.

149. — *Radioactive Lead.* F. Giesel. *Chem. News*, LXXXV, 89, 1902.

150. — *Radioactivity and the Electron theory.* Sir W. Crookes. *Chem. News*, LXXXV, 109, 1902.

151. — *Valency and Radioactivity.* Martin. *Chem. News*, LXXXV, 310, 1902.

152. — *Ueber radioactive Substanzen und deren Strahlen.* F. Giesel. Stuttgard, 1902.

153. — *Excited radioactivity and the Method of its Transmission.* E. Rutherford. *Phil. Mag.*, t. V, p. 95 (janvier 1903).

154. — *Becquerel Rays.* J.-J. Thomson. *Harpers Mag.*, CVI, 289 (janvier 1903).

155. — *Ueber den Emanationskörper aus Pechblende und ueber Radium.* F. Giesel. *Berichte der D. Chem. Ges.*, XXXVI, Heft. 2, s. 342 (13 janvier 1903).

156. — *Ueber den radioactiven Stoff Polonium.* Mme Curie. *Phys. Zeitschrift.*, IV, s. 234 (12 décembre 1902).

157. — *Die magnetische und elektrische Ablenkung der leicht absor-*

bierbaren Radiumstrahlen. E. Rutherford. *Phys. Zeitschr.*, IV, s. 235 (10 novembre 1902).

158. — *Sur la déviabilité magnétique et la nature de certains rayons émis par le polonium*. H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 199 (26 janvier 1903).

159. — *Sur la radioactivité induite et sur l'émanation du radium*. P. Curie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 223 (26 janvier 1903).

160. — *The Magnetic and Electric Deviation of the easily absorbed Rays from Radium*. E. Rutherford. *Phil. Mag.*, t. V, p. 177 (février 1903).

161. — *Die Stellung des Radium im periodischen System nach seinem Spektrum*. C. Runge und J. Precht. *Phys. Zeitschr.*, IV, s. 285 (31 janvier 1903).

162. — *Ueber Absorption von Gravitationsenergie durch radioactive Substanz*. R. Geigel. *Ann. der Phys.* Bd. X, s. 429.

163. — *Ueber das Bunsenflammenspektrum des Radium*. C. Runge und J. Precht. *Ann. der Phys.* Bd. X, s. 655.

164. — *Bemerkungen zu der Arbeit des Hrn. R. Geigel. « Ueber die Absorption von Gravitationsenergie durch radioactive Substanz »*. W. Kaufmann. *Ann. der Phys.* Bd. X, s. 894.

165. — *Sur la disparition de l'activité induite par le radium sur les corps solides*. P. Curie et J. Danne. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 364 (9 février 1903).

166. — *Sur le rayonnement du polonium et du radium*. H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 431 (16 février 1903).

167. — *Sur la radioactivité induite provoquée par les sels d'actinium*. A. Debierne. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 446 (16 février 1903).

168. — *De l'action pathogène des rayons et des émanations émis par le Radium sur différents tissus et différents organismes*.

J. Danysz. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 461 (16 février 1903).

169. — *On Radioactivity from Snow*. C. T. R. Wilson. *Proc. Phil. Soc. Camb.*, XII, 85 (16 février 1903).

170. — *Ueber Polonium*. F. Giesel. *Berichte der D. Chem. Ges.*, XXXVI. Heft 4, s. 728 (18 fév. 1903).

171. — *Die Radioactiven Stoffe nach dem gegenwärtigen Stande der wissenchaftlichen Erkenntniss*. K. Hofmann. Leipzig, 1903.

172. — *Bewirken radioaktiven Substanzen eine Absorption von Gravitationsenergie*. C. Forch (7 février 1903). *Phys. Zeitschrift*, IV, s. 318 (1er mars 1903).

173. — *Eine Bemerkung zur Arbeit des Hrn R. Geigel ueber Absorption von Gravitationsenergie*. G. Kucera. *Phys. Zeitschrift*, IV, s. 319 (1er mars 1903).

174. — *Entgegnung auf die Bemerkungen der Herren C. Forch und G. Kucera*. R. Geigel (3 mars 1903). *Phys. Zeitschr.*, IV, s. 353 (15 mars 1903).

175. — *Ueber die Möglichkeit radioaktivierende Emanationen in flussiger Luft anzureichern*. H. Ebert. *Sitz. Berich. der Math. Phys. Kl. der K. Bayer. Akad. der Wiss.*, XXXIII, 1903. Heft I (7 mars 1903).

176. — *Ueber die Elektromagnetische Masse der Elektronen*. W. Kaufmann (7 mars 1903). *Nachricht. der K. Ges. der Wiss. zu Göttingen. Math. Phys. Kl.*, 1903, Heft 3.

177. — *Sur la production de la radioactivité induite par l'actinium*. A. Debierne. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences.*, t. CXXXVI, p. 671 (16 mars 1903).

178. — *Sur la chaleur dégagée spontanément par les sels de radium*. P. Curie et A. Laborde. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 673 (16 mars 1903).

179. — *Radioactivity and Chemistry*. G. F. Barker (19 mars 1902). *School of Mines Quarterly*, vol. XXIV. Apr. 1903, n° 3.

180. — *The Emanations of Radium*. Sir. W. Crookes. *Proc. Roy. Soc.*, LXXXI, 405 (19 mars 1903). *Electrician*, 3 avril 1903.

181. — *Weitere Versuche zur Frage « Bewirken radioactive Substanzen eine Absorption von Gravitationsenergie ».* C. Forch. (26 mars 1903). *Phys. Zeitschr.*, IV, S. 443 (1er mai 1903).

182. — *The radioactivity of Uranium.* E. Rutherford and M. F. Soddy. *Phil. Mag.*, t. V, p. 441 (avril 1903).

183. — *A Comparative Study of the Radioactivity of Radium and Thorium.* E. Rutherford and M. F. Soddy. *Phil. Mag.*, t. V, p. 445 (avril 1903).

184. — *Some Remarks on Radioactivity.* E. Rutherford. *Phil. Mag.*, t. V, p. 481 (avril 1903).

185. — *Ueber die durch radioaktive Emanation erregte Scintillierende Phosphorescenz der Sidot-Blende.* J. Elster und H. Geitel (27 mars 1903). *Phys. Zeitschrift*, IV, s. 439, 1er mai 1903.

186. — *Induced Radioactivity excited in Air at the Foot of Water-Falls*, J. C. Mc. Lennan. *Phil. Mag.*, t. V, p. 419 (avril 1903).

187. — *The Position of Radium in the Periodic System according to its Spectrum.* C. Runge and J. Precht. *Phil. Mag.*, t. V, p. 476 (avril 1903).

188. — *Action des corps radioactifs sur la conductibilité électrique du sélénium.* E. Van Aubel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 929 (14 avril 1903).

189. — *Sur le rayonnement du polonium et sur le rayonnement secondaire qu'il produit.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 977, (27 avril 1903).

190. — *On the Specific Ionization produced by the Corpuscles given out by Radium.* J.-J. E. Durack. *Phil. Mag.*, t. V, p. 550 (mai 1903).

191. — *Condensation of the Radioactive Emanations.* E. Rutherford and M. F. Soddy. *Phil. Mag.*, t. V, p. 561 (mai 1903).

192. — *Radioactive Change.* E. Rutherford and M. F. Soddy. *Phil. Mag.*, t. V, p. 576 (mai 1903).

193. — *Ueber das Atomgewicht des Radiums.* Mme Curie (28 mars 1903). *Phys. Zeitschr.*, IV, s. 456 (15 mai 1903).

194. — *Conductibilité et ionisation résiduelle de la paraffine solide sous l'influence du rayonnement du radium.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences*, t. CXXXVI, p. 1173 (18 mai 1903).

195. — *On the Radioactivity of Metals generally.* J. C. Mc. Lennan and E. F. Burton (18 mai 1903). *University of Toronto Studies*, 1903. *Phil. Mag.*, VI, 343 (1er sept. 1903).

196. — *Zur Elektrostatischen Ablenkbarkeit der Rutherfordstrahlen.* Th. Des Coudres, 11 mai 1903. *Phys. Zeitschrift*, IV, s. 483.

197. — *Radioactivity of Ordinary Materials.* J. Strutt. *Phil. Mag.* t. V, p. 680 (juin 1903).

198. — *Sur les rayons émis par le plomb radioactif.* Korn et Strauss. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 1312 (2 juin 1903) et *Ann. der Physik.*, t. XI, p. 397 (14 mai 1903).

199. — *Sur l'émanation du radium et son coefficient de diffusion dans l'air.* P. Curie et J. Danne. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 1314 (2 juin 1903).

200. — *Modern views on Matter.* Sir W. Crookes. *An adress before the Congress of applied Chemistry at Berlin* (5 juillet 1903).

201. — *Eine merkwürdige Beobachtung mit Radium.* E. Dorn (29 mai 1903). *Phys. Zeitschr.*, IV, s. 507.

202. — *Hypothèse sur la nature des corps radioactifs.* F. Re. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 1393 (8 juin 1903).

203. — *Sur une propriété des rayons α du radium.* H. Becquerel. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXVI, p. 1517 (22 juin 1903).

204. — *Radium.* J.-J. Thomson. *Nature*, LXVII, 601 (1903).

205. — *On the Atomic Weight of Radium.* W. Marshall Watts. *Phil. Mag.*, t. VI, p. 64 (juillet 1903).

206. — *The Preparation and Properties of an intensely Radioactivity Gas from Metallic Mercury.* R. J. Strutt. *Phil. Mag.*, t. VI, p. 113 (juillet 1903).

207. — *Ueber die angebliche Radioaktivität und die Luminescenz von Reten.* E. von Schweidler. *Phys. Zeitschr.* (8 juin 1903) IV, s. 521 (1° Juli 1903).

208. — *Ueber die radioaktive Emanation in der atmosphärischen Luft.* J. Elster und H. Geitel. *Phys. Zeitschr.* (6 juin 1903) IV, s. 522 (1° Juli 1903).

209. — *Versuch ueber die Zeitliche Gewichtsänderung von Radium.* E. Dorn (5 juin 1903). *Phys. Zeitschr.*, IV, s. 530 (1° Juli 1903).

210. — *Ueber die Radioaktivität der Metalle im allgemeinen.* J. C. Mc. Lennan und E. F. Burton (1° Juli 1903). *Physikalische Zeitschrift*, IV, s. 553 (15 Juli 1903).

211. — *Bemerkung zur Ablenkung der positiven Strahlen im elektromagnetischen Felde.* J. Stark (7 Juli 1903). *Physikalische Zeitschrift*, IV, s. 583 (1 August. 1903).

212. — *On the spectrum of the spontaneous luminous radiation of Radium at ordinary temperatures.* Sir William Huggins and Lady Huggins. *Proc. Roy. Soc.*, vol. LXXII, p. 196, (17 July-5 August. 1903).

213. — *Ueber die Selbstelektrisierung des Radiums und die Intensitat der von ihm ausgesandten Strahlung.* W. Wien. *Physikalische Zeitschrift*, IV, s. 626 (1er sept. 1903).

214. — *Versuche über Radioaktivität und die Entstehung von Helium aus Radium.* W. Ramsay und F. Soddy. *Physikalische Zeitschrift*, IV, s. 651 (15 sept. 1903). *Nature*, LXVIII, 354 (13 Aug. 1903). *Proc. Roy. Soc.*, LXXII, 204 (1903).

TABLE DES MATIÈRES

Pages.

Avant-Propos 1

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE PREMIER

RAYONNEMENT DE L'URANIUM ET DES SELS DE CE MÉTAL

§ 1. Premières observations (février-juin 1896). 9
§ 2. Premières expériences relatives au rayonnement qu'émettent les corps frappés par le rayonnement de l'uranium. 37

CHAPITRE II

PHÉNOMÈNES ANORMAUX PRÉSENTÉS PAR DIVERSES SUBSTANCES PHOSPHORESCENTES. 41

CHAPITRE III

EXPÉRIENCES ET MESURES ÉLECTRIQUES. — RÔLE DES GAZ AMBIANTS (novembre 1896 — mai 1897). 53
§ 1. Modification de l'air traversé par les nouveaux rayons. 54
§ 2. Expériences dans l'air à diverses pressions. 61
§ 3. Expériences avec divers gaz. 65
§ 4. Expériences à diverses températures. 67

Pages.
§ 5. Mesures du débit d'électricité en fonction du potentiel. 69
§ 6. Expériences diverses. 82
§ 7. Vérifications, extension et interprétation des résultats précédents Expériences de M. E. Rutherford. 94

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE IV

GÉNÉRALISATION DES PROPRIÉTÉS DE L'URANIUM. — RECHERCHES PHYSIQUES AVEC LES PREMIÈRES PRÉPARATIONS RADIOACTIVES (1897-1898-1899)

§ 1. Nouvelles substances actives. 101
§ 2. Recherches physiques sur le rayonnement de l'uranium et des nouvelles substances radioactives. 107
§ 3. Recherches relatives à la réfraction des nouveaux rayons. . . 110
§ 4. Rayonnement secondaire. 113
§ 5. Recherches sur les phénomènes de phosphorescence produits par le rayonnement du radium. 115

CHAPITRE V

I. — INFLUENCE D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE SUR UNE PARTIE DU RAYONNEMENT DES CORPS RADIOACTIFS

§ 1. Premières observations sur les rayons déviables par un champ magnétique. 126
§ 2. Rayons peu déviables ou rayons α. 134
§ 3. Étude des trajectoires des rayons déviables dans un champ magnétique. 142
Déviation magnétique dans le vide.. 148
Identité du rayonnement émis par les sels radifères diversement actifs. 151

Pages.

Trajectoires fermées du rayonnement dans un champ magnétique uniforme. 152
§ 4. Dispersion et analyse du rayonnement déviable dans un champ magnétique. Absorption du rayonnement. 154
§ 5. Variation apparente de l'absorption avec la distance des écrans à la source active. 161

II. — PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES PRODUITS PAR LE RAYONNEMENT DU RADIUM

§ 1. Charge électrique du rayonnement du radium. Expérience de M. et Mme Curie. 165
§ 2. Déviation électrique du rayonnement du radium. 167
Détermination simultanée de la déviation électrique et de la déviation magnétique pour le même rayon. 179

III. — RAYONS CHARGÉS POSITIVEMENT OU RAYONS α

CHAPITRE VI

§ 1. Transmission du rayonnement au travers des corps. Rayonnement secondaire.. 201
Mesures relatives aux rayons du radium. 206
Mesures relatives aux rayons de l'uranium. 214
§ 2. Transmission du rayonnement au travers de lames épaisses de verre ou de métal. Rayons secondaires 219
Rayons déviables. 220
Rayons non déviables. 222
§ 3. Rayonnement pénétrant du polonium et rayons secondaires produits par ce rayonnement.. 233
§ 4. Considérations sur quelques particularités que présentent les radiographies obtenues avec les corps radioactifs 239

CHAPITRE VII

EXPÉRIENCES DIVERSES RELATIVES AU RAYONNEMENT DE L'URANIUM ET DU RADIUM

Pages.

§ 1. Émission du rayonnement pénétrant de l'uranium à la température de l'air liquide 243
§ 2. Sur quelques actions chimiques produites par le rayonnement de l'uranium et du radium 248
§ 3. Conductibilité des diélectriques solides sous l'influence du rayonnement du radium. Persistance temporaire de l'ionisation 254
§ 4. Action physiologique du rayonnement du radium sur la peau, et sur les graines 262
§ 5. Spinthariscope de sir W. Crookes 268

CHAPITRE VIII

ÉMANATION

§ 1. Émanation dans l'air et dans les espaces fermés 269
§ 2. Activation de diverses substances précipitées dans les dissolutions de sels radioactifs 284

CHAPITRE IX

RÉSUMÉ DES PRINCIPAUX FAITS OBSERVÉS. — CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

§ 1. Résumé des faits observés 308
§ 2. Considérations théoriques 317
Nature de l'émission des corps radioactifs 317
Hypothèses relatives aux sources de l'énergie dépensée 328

BIBLIOGRAPHIE 337

Paris. — Typographie de Firmin-Didot et Cie, impr. de l'Institut, rue Jacob, 56. — 43286.

ERRATA

Page 13, ligne 7, au lieu de *due* lire *dû*.

Page 15, ligne 21, au lieu de ; mettre ,

Page 16, ligne 14, au lieu de ; mettre .

Page 24, ligne 1, au lieu de *d'un* lire *d'une*.

Page 57, ligne 4 en remontant, au lieu de : mettre .

Page 57, ligne 3 en remontant, au lieu de . mettre :

Page 72, dans le tableau, la colonne n° 9 incorrectement intitulée $\frac{\Delta V}{\Delta t}$, représente les rapports $\frac{\Delta V}{\Delta' t}$, et la colonne n° 12 représente les mêmes rapports corrigés de la déperdition.

Page 87, dans le tableau, au lieu de *lamelle de ulfate double*, lire *de sulfate double*.

Page 223, ligne 3 en remontant, au lieu de - *ormation*, lire - *formation*.

Page 227, *la figure 26*, placée à l'envers, doit être retournée.

Page 230, ligne 18, au lieu de *C* lire *c*.

Page 286, ligne 4, au lieu de *l'actinium* lire *l'uranium*.

Page 291, ligne 7, au lieu de *égaleme n* lire *également*.

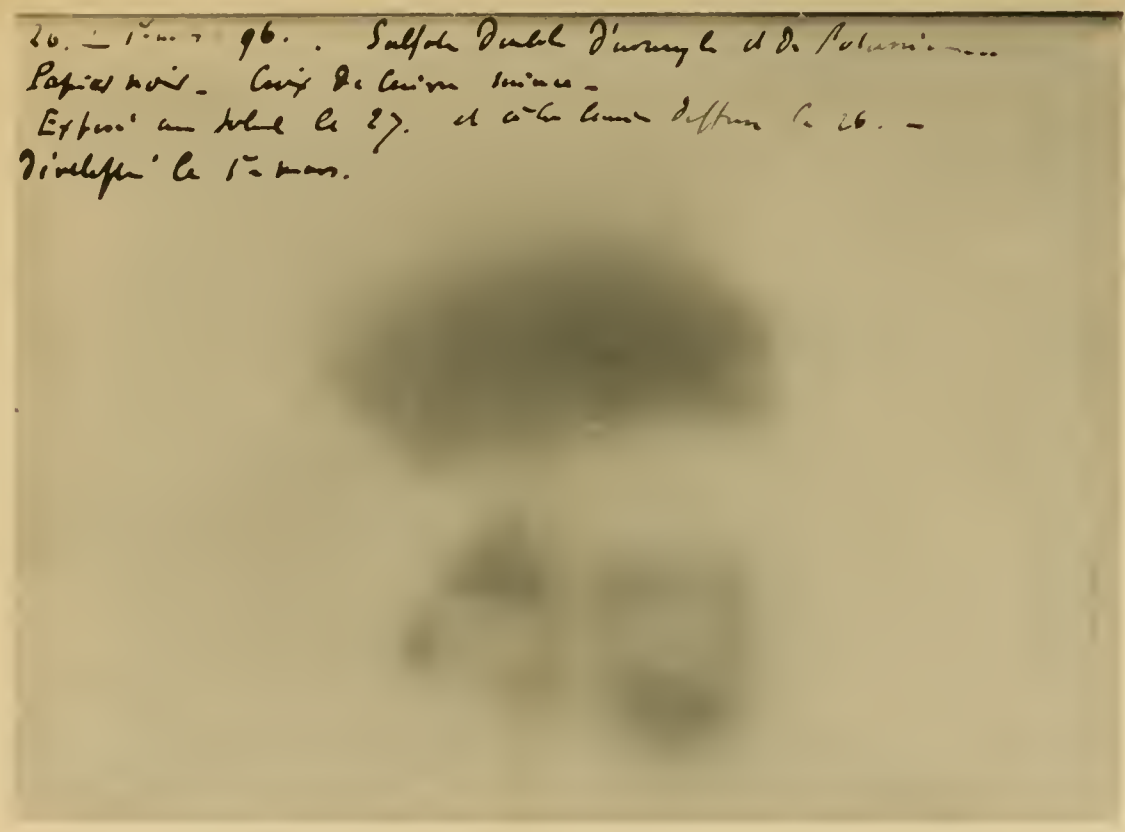
NOTE RELATIVE AUX PLANCHES

Les planches ont été faites au moyen de contre-épreuves des clichés originaux. Les positions et les grandeurs des images sont donc la reproduction exacte de celles des clichés. Malheureusement les procédés d'impression n'ont permis d'obtenir, ni la netteté et la finesse des détails, ni les valeurs relatives des intensités que présentent les clichés et les épreuves tirées sur papier photographique. En outre, le tirage des planches est irrégulier, de sorte que certaines épreuves, à peu près bonnes sur certains exemplaires, sont mauvaises sur d'autres. On peut faire, en particulier, les observations suivantes :

Les figures 13, 14 et 29 ont des taches qui n'existent pas sur les clichés. La figure 18 est tirée trop faible. La figure 22 présente un léger décalage dans l'assemblage des deux images. La figure 34 ne rend pas la netteté de la belle épreuve originale.

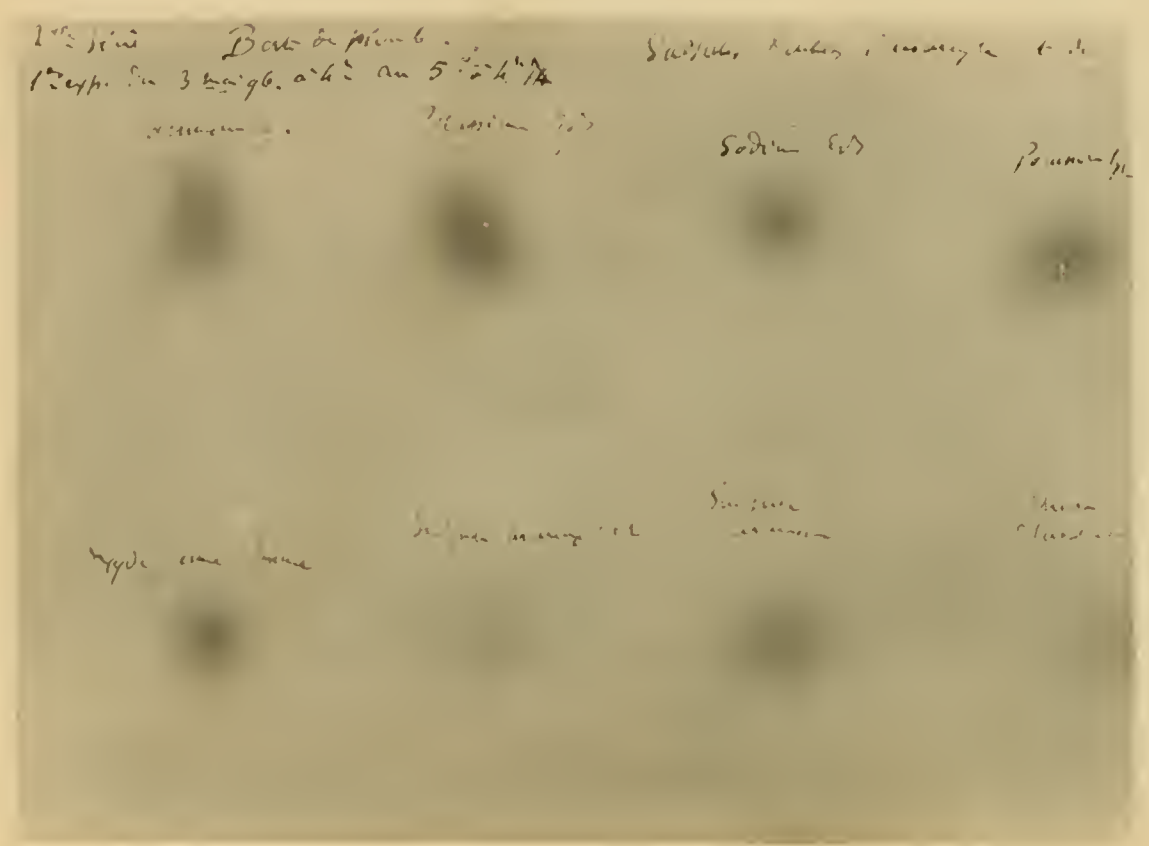
Dans la légende de la figure 37 il faut lire « Dispositif du n° 38 ».

Les figures 57, 58 sont tirées trop faibles. Dans la figure 60 la trace des rayons γ n'est pas reproduite avec l'intensité et la netteté qu'on observe dans le cliché. La figure 64 est tirée trop forte, et la figure 69 est loin de donner la netteté du cliché original.

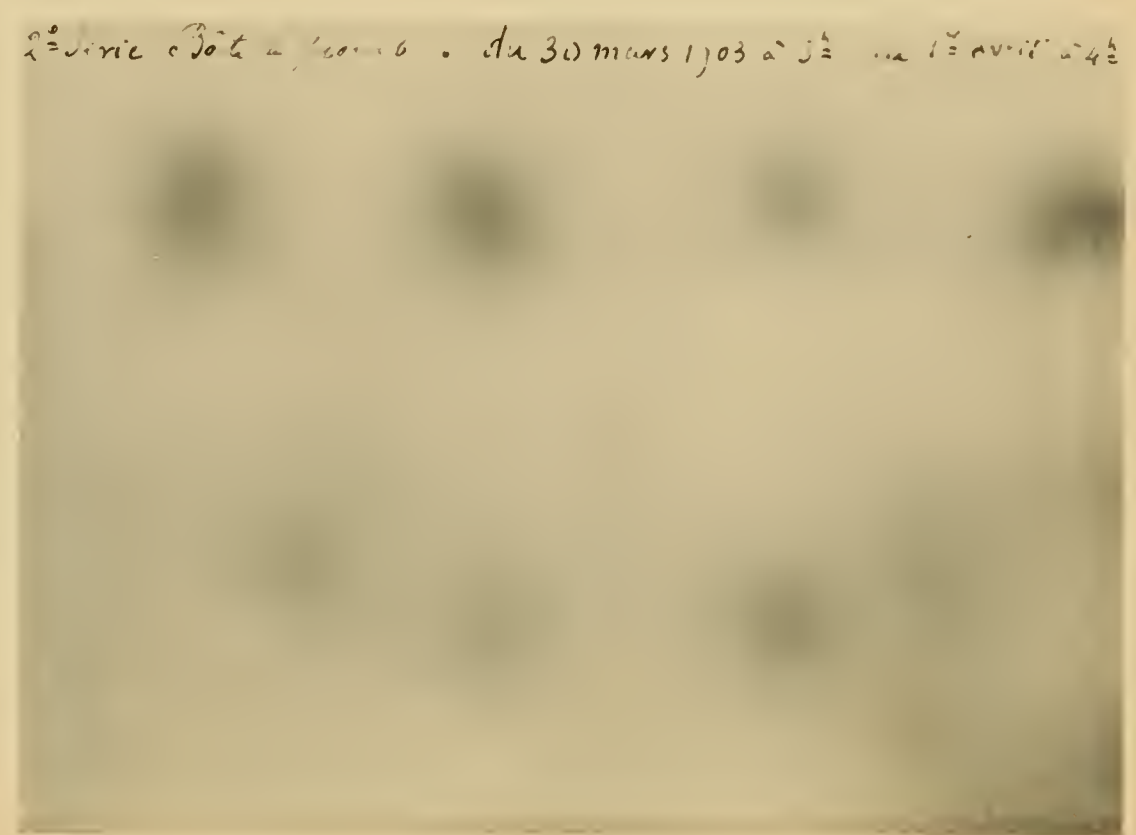


1

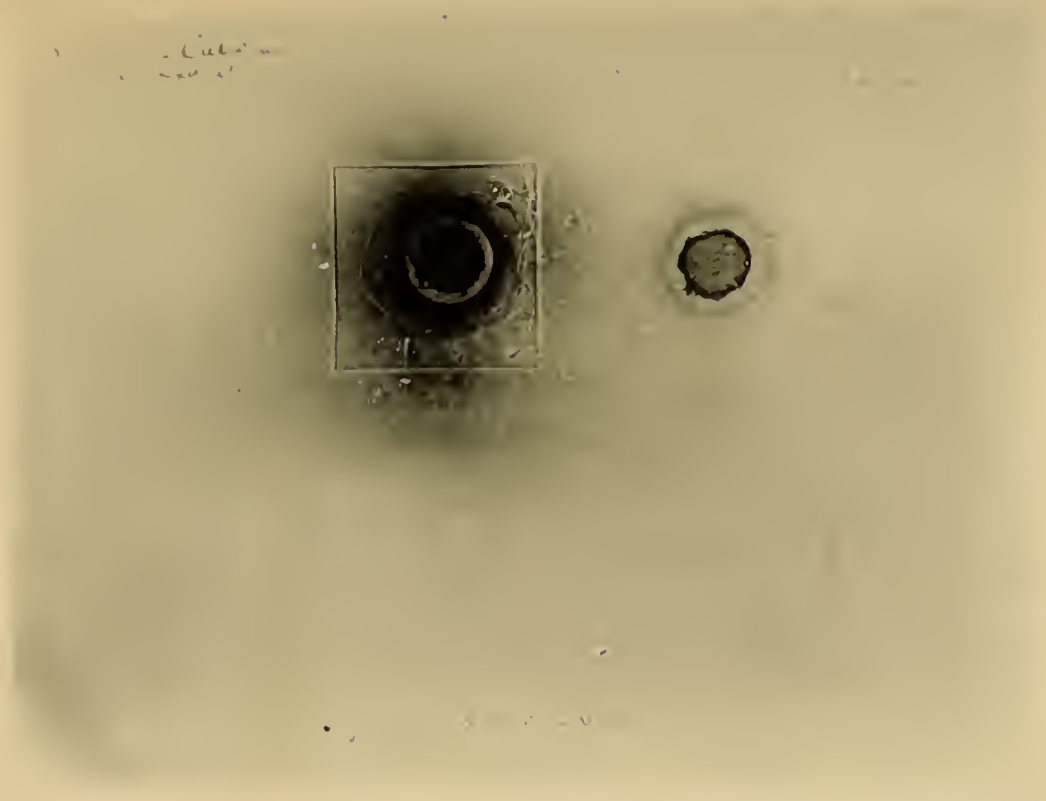
2



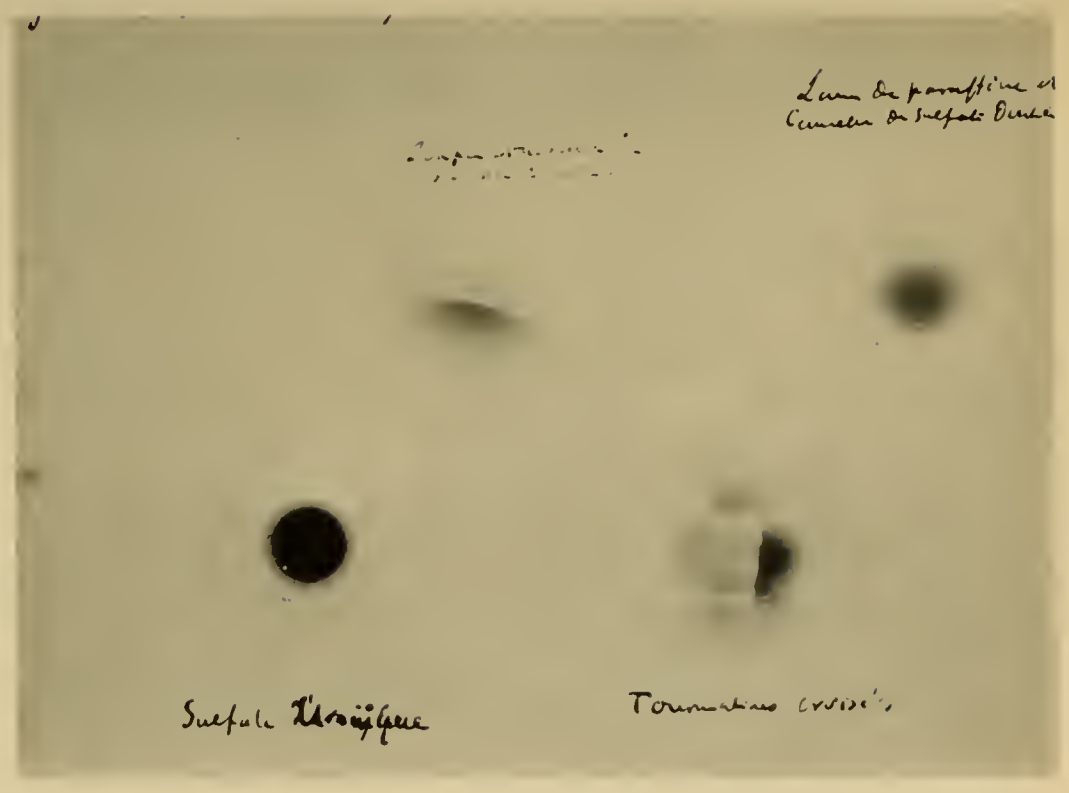
3



4



5 Du 7 mars 1896 à 4 h. au 9 mars à 9 h. 1/2 du matin.

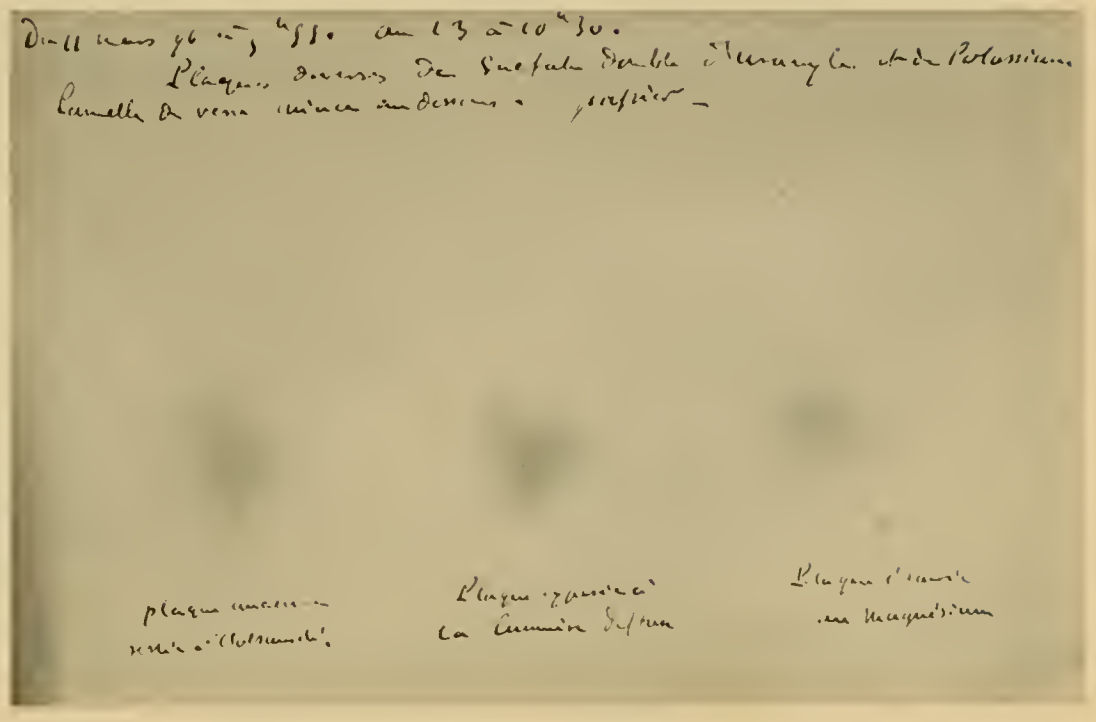


6 Du 9 mai 1896 à 2 h. 40 au 18 mai à 9 h. du matin.

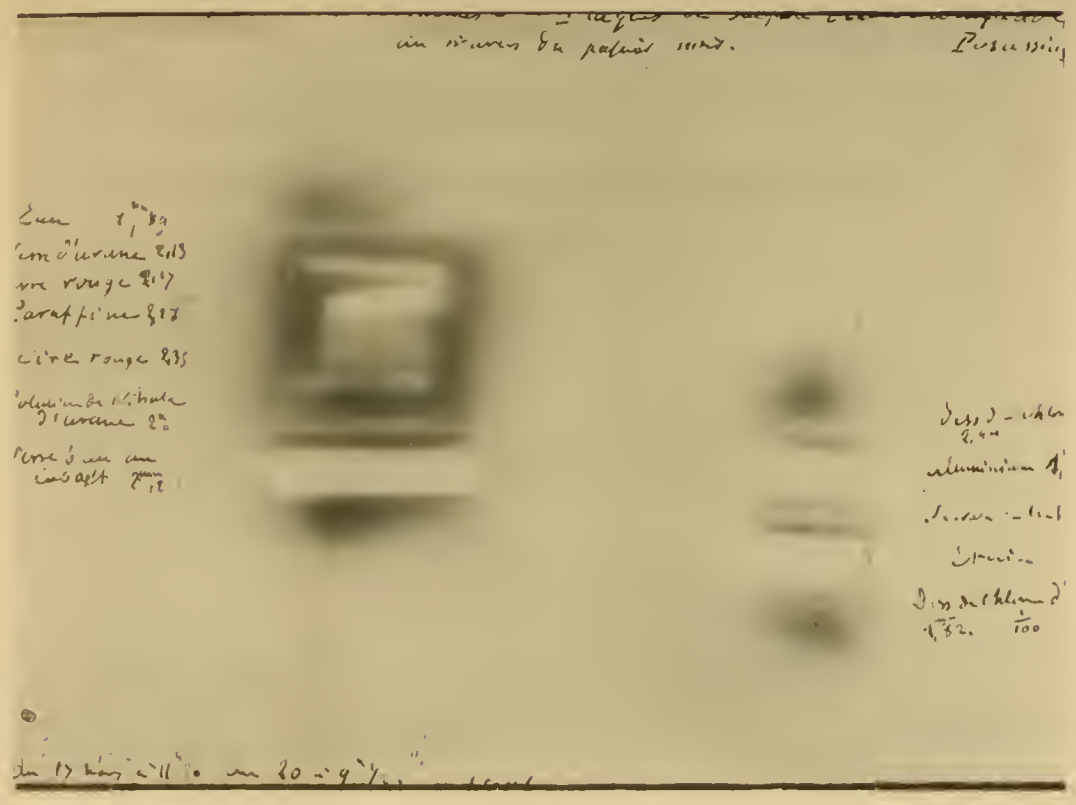
7 Dispositif de l'épreuve n° 5.

8 Tourmalines. 24 juill.-7 nov. 1896.

9 Transparence du verre pilé.
Du 27 au 29 mars 1896.

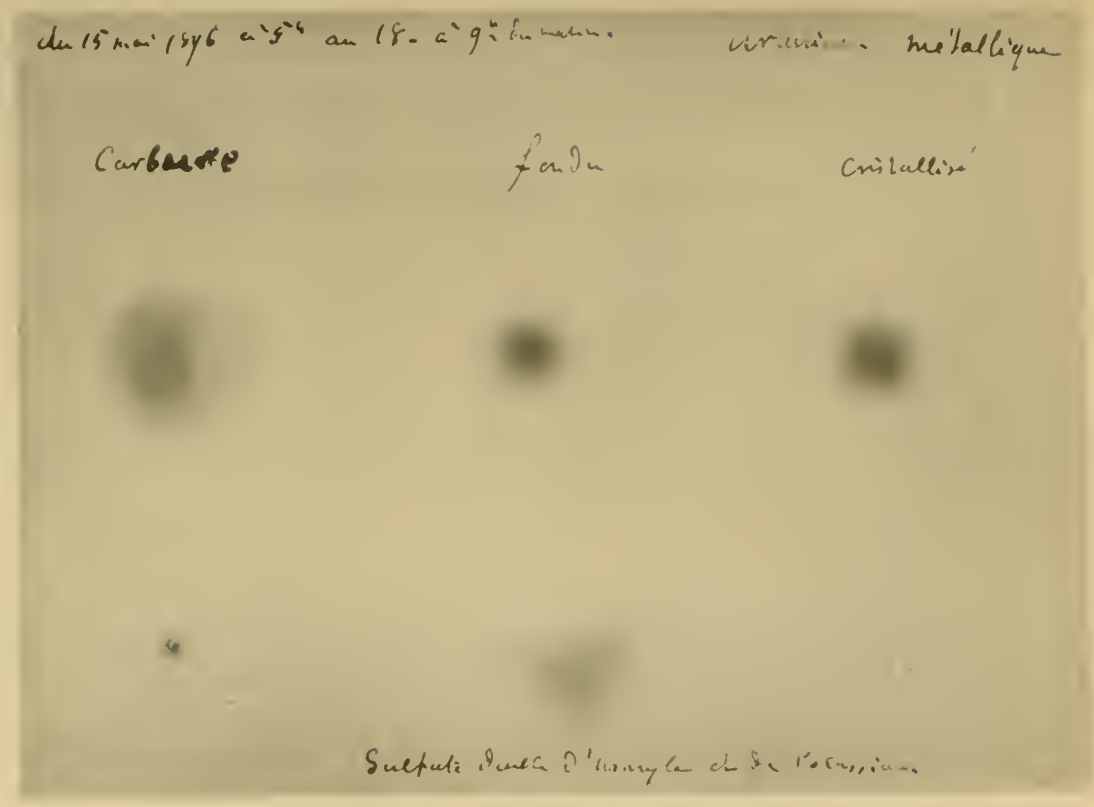


10



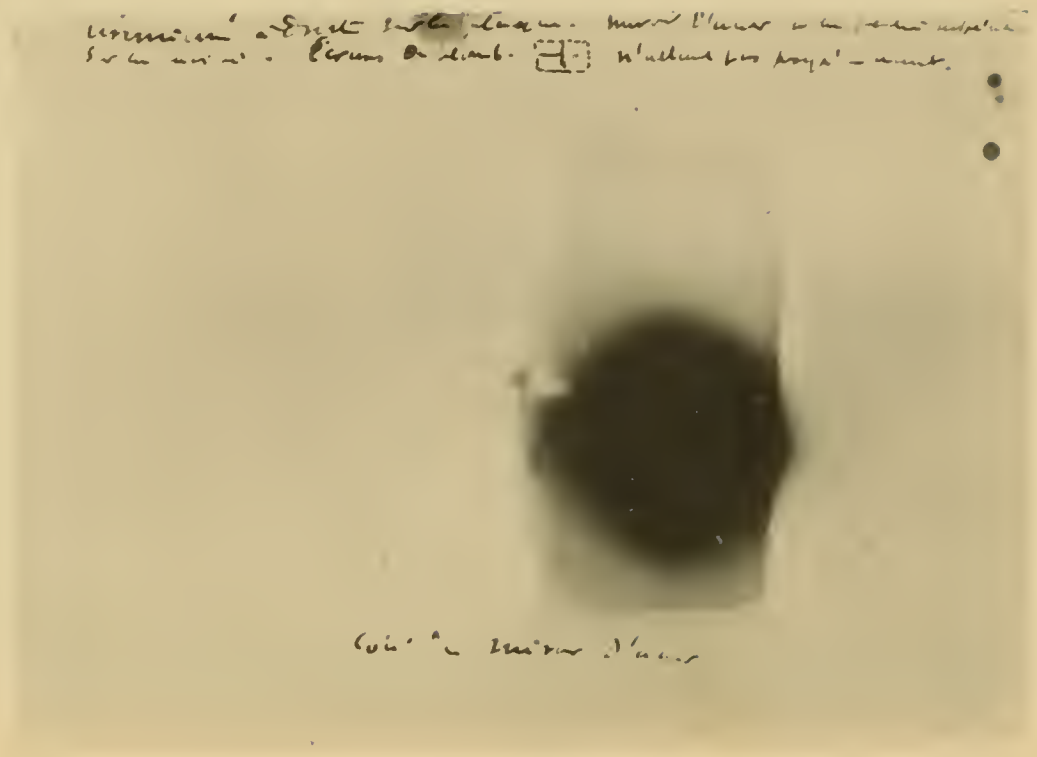
11

Du 17 au 20 mars 1896.



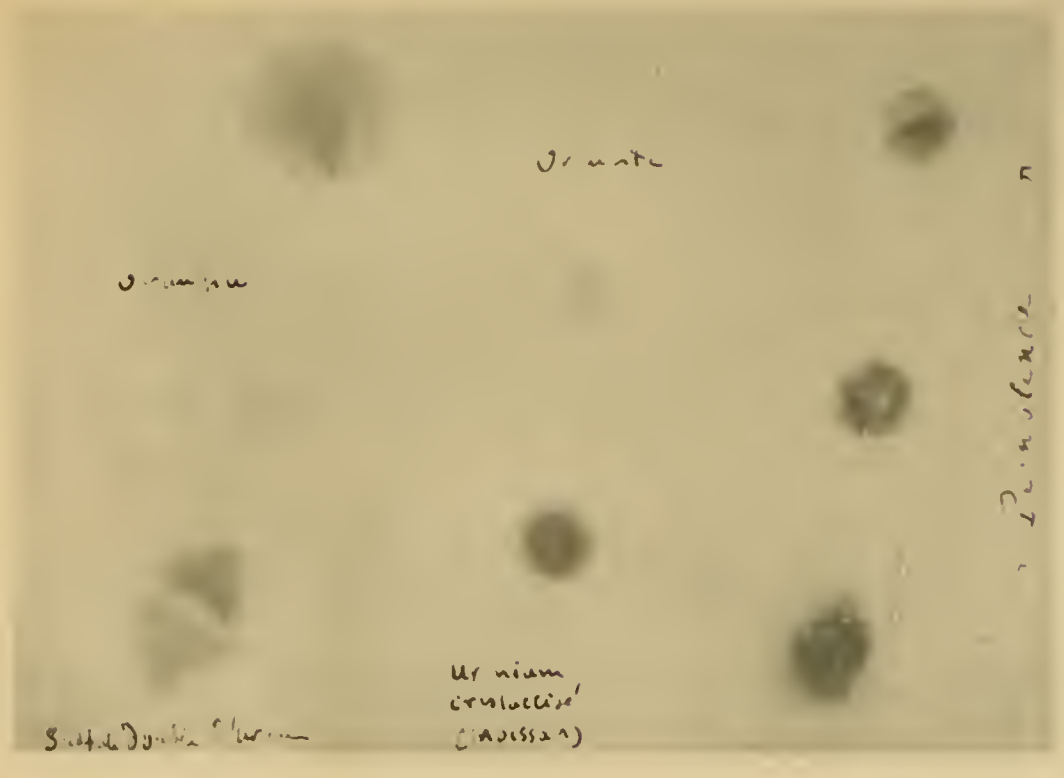
12

13



14

Du 5 février au 20 février 1897.

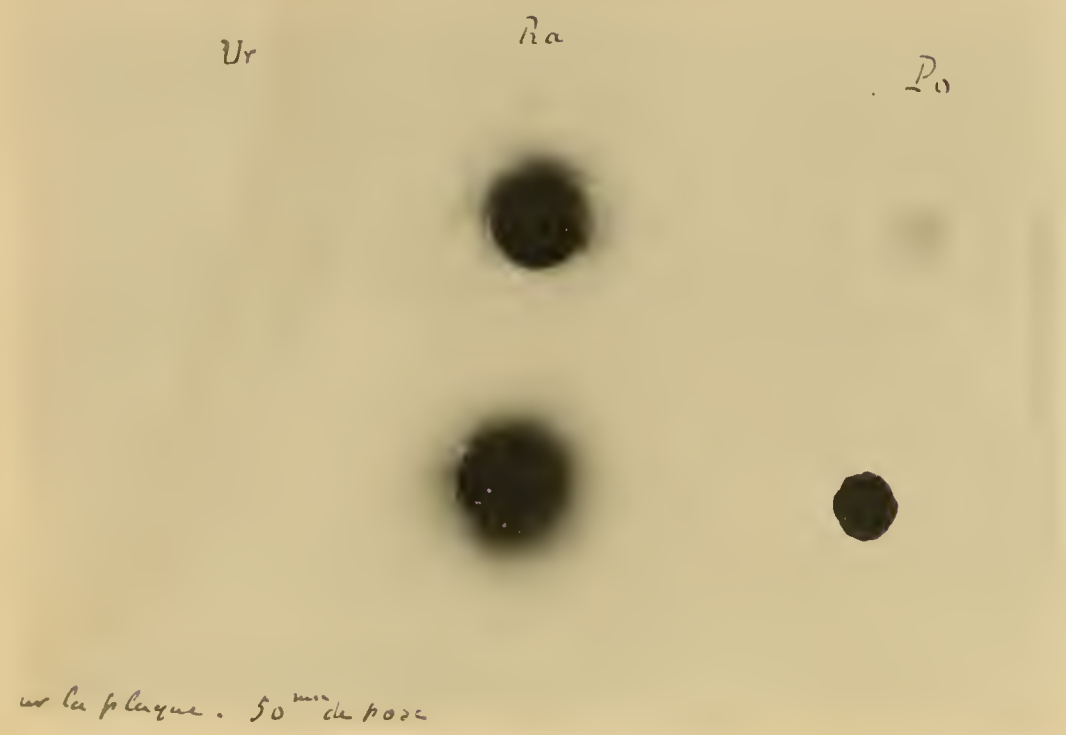


15 B 24-27-4-98.

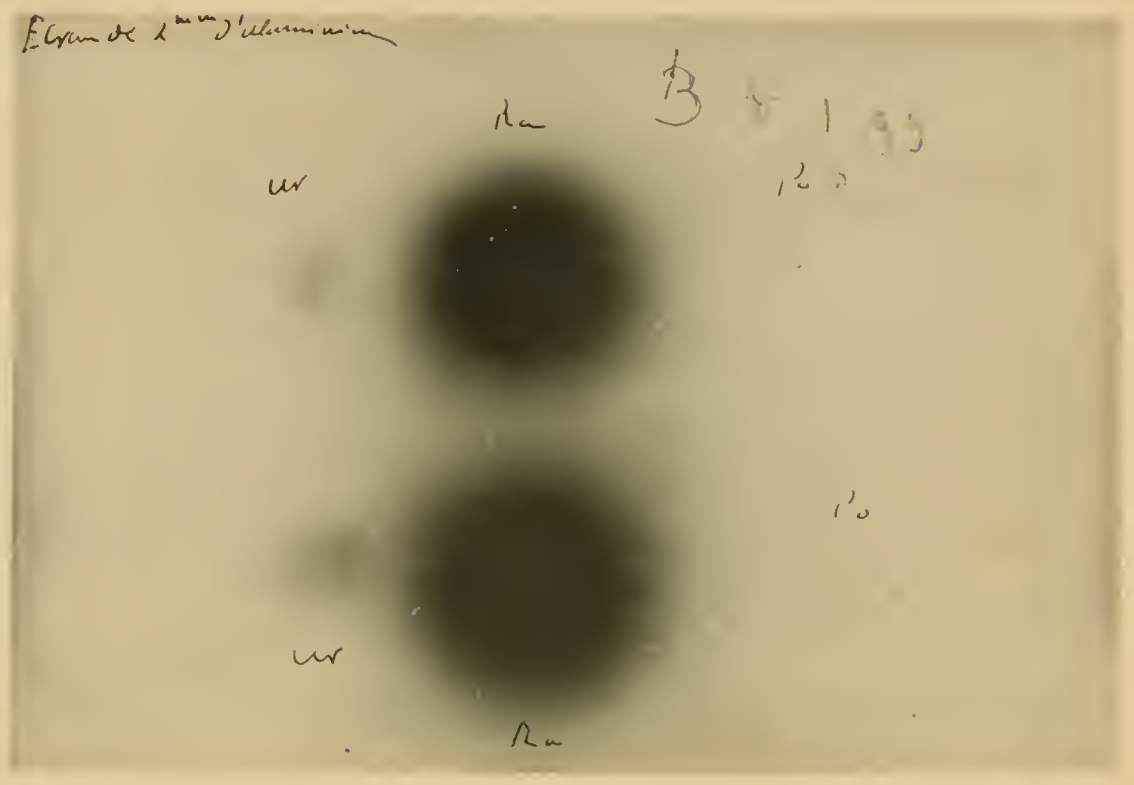
16 A 5-1-00.

17 B 17-4-03.

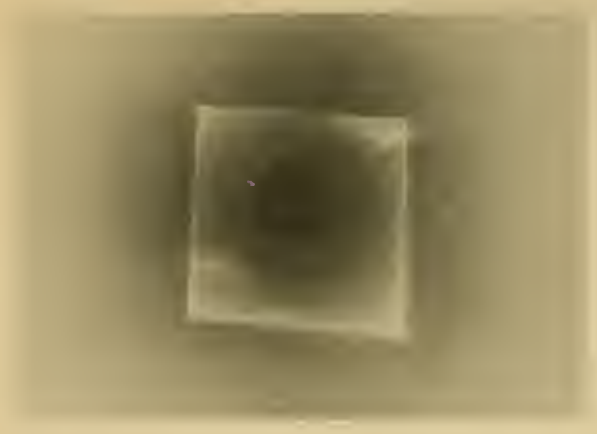
18 A 14-3-03.



19 A 7-1-99.



20 B 8-1-99.



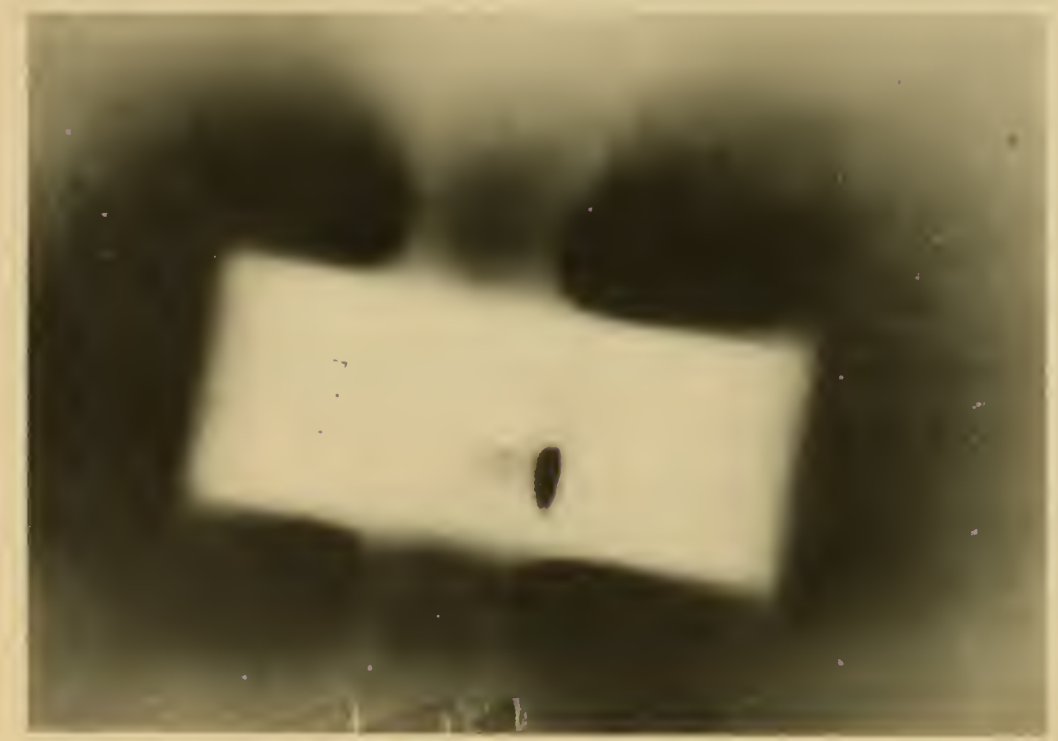
21 B 31 - 1 - 99.

22 Dispositif du n° 25.

23 Dispositif du n° 26.

24 Dispositif du n° 27.

25 A 2 - 2 - 99.



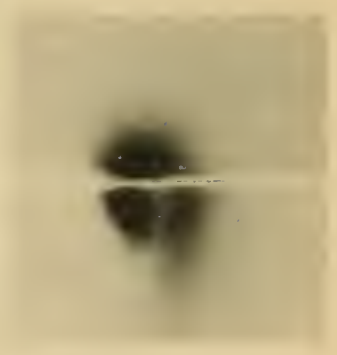
26 A 11 - 2 - 99.

27 A 14 - 3 - 99.

28

37 Dispositif au n° 38.

31 B 26-12-99.



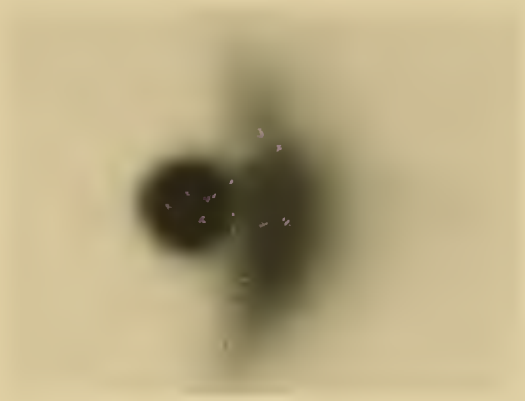
32 B 27-12-99.

33

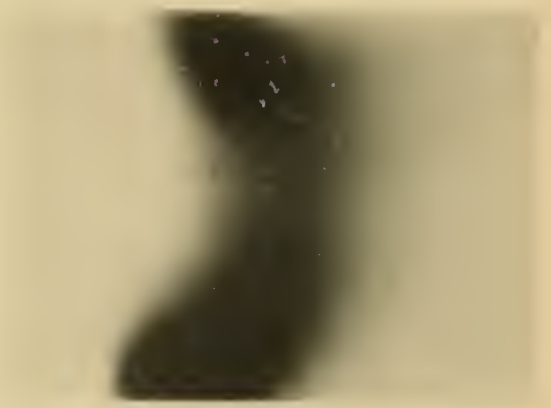
34 C 8-3-00.

35 A 21-3-00.

36 C 8-2-00.



29



30

38 B 2-3-00.

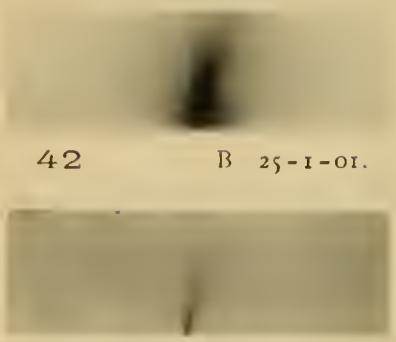
39 C 1-5-00.

40 Al B 2-5-00.

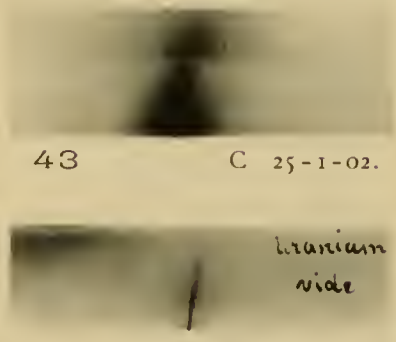
41 A 5-5-00.

46 B 13-2-03.
Agrandissement.

47 Dispositif des n° 48 et 49.



42 B 25-1-01.



43 C 25-1-02.

50 Dispositif.

45 Th. O B 8-4-02.

48 B 24-3-00.

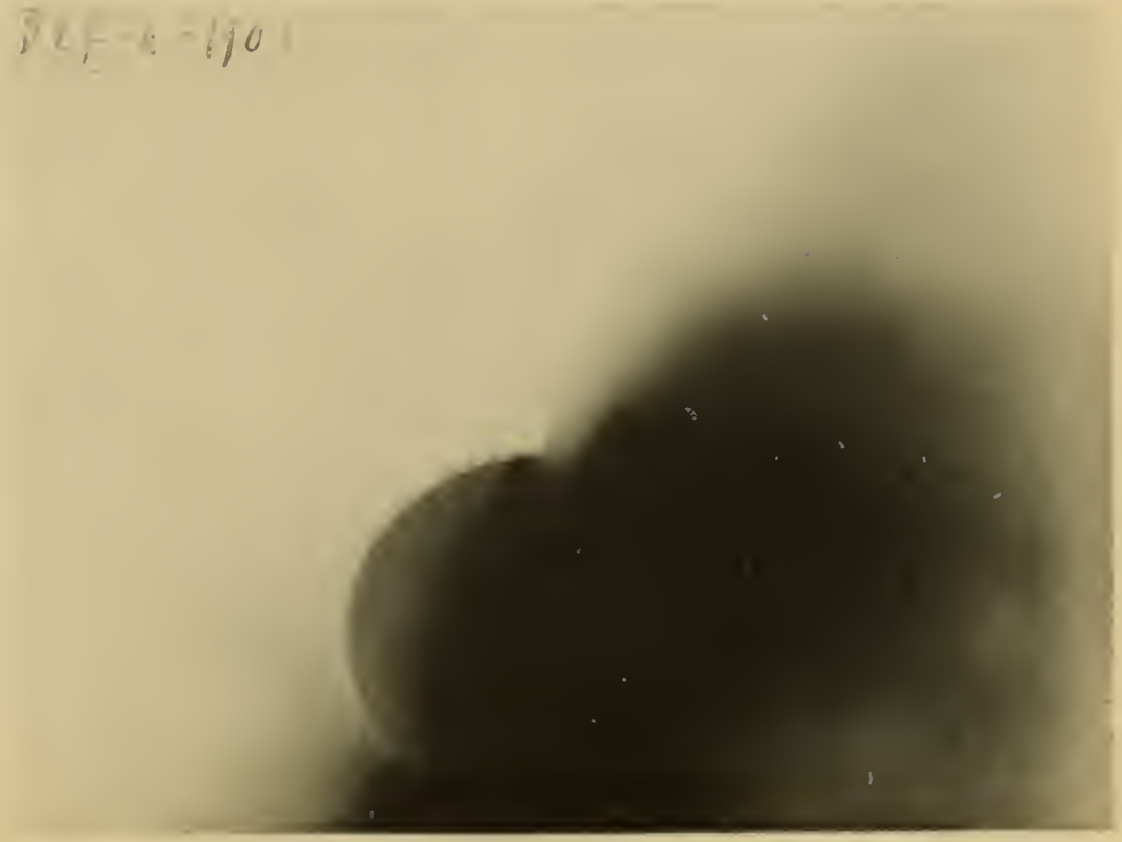
49 C 28-3-00.

Uranium vide

44 Ur. B 22-1-01.

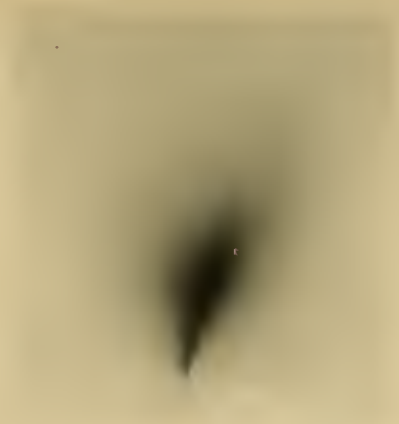
44 *bis* A 25-4-03.

51



52

39 C 1-5-00.



40 Al B 2-5-00.

41 A 5-5-00.

46 B 13-2-03.
Agrandissement.

47 Dispositif des n°s 48 et 49.

42 B 25-1-01.

43 C 25-1-02.

50 Dispositif.

48 B 24-3-00.

49 C 28-3-00.

44 Ur. B 22-1-01.

44 *bis* A 25-4-03.

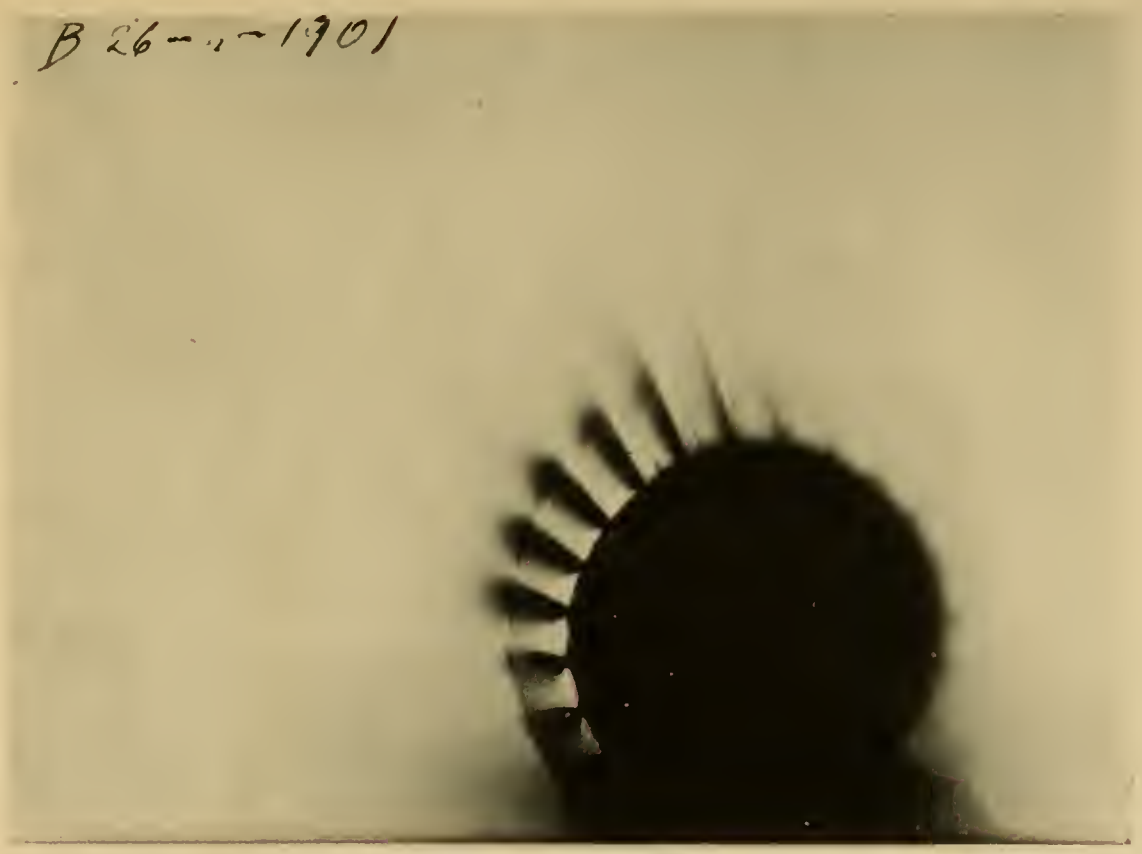
Uranium vide

45 Th. O B 8-4-02.

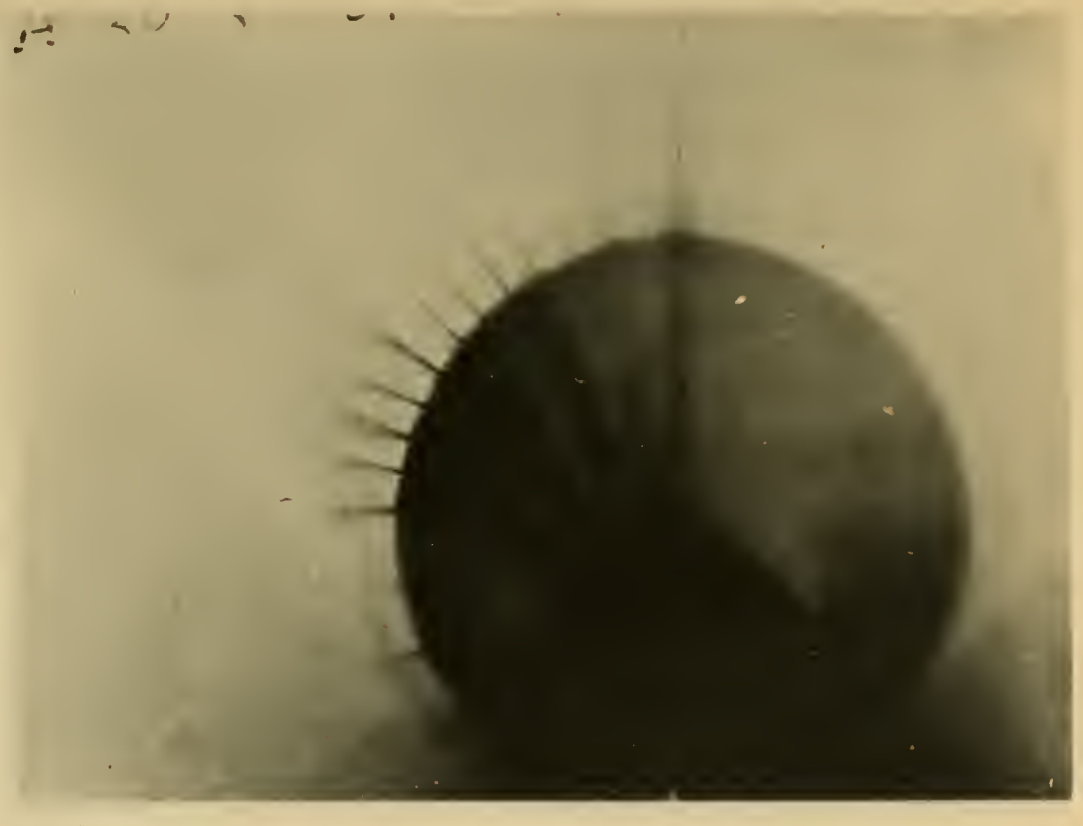
A 27-11-1901

51

52

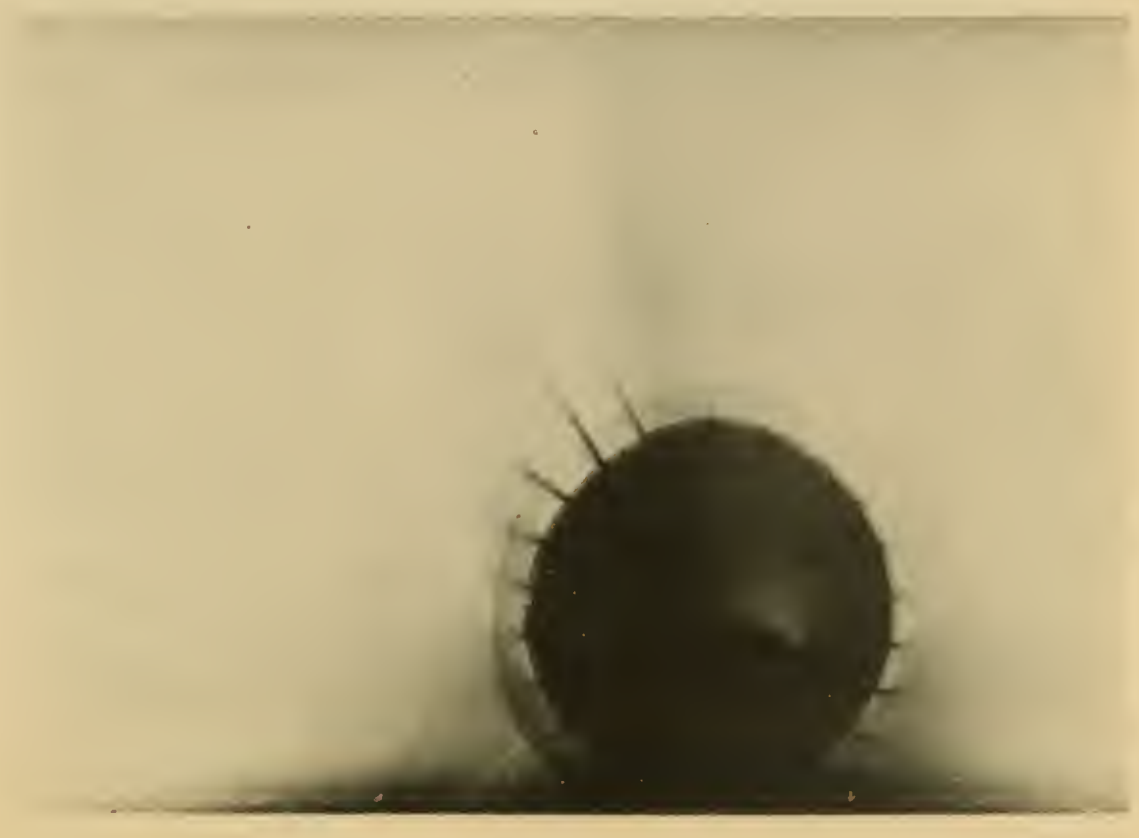


53



54 A 20-5-01.

55 A 21-5-01.



56 A 18-5-01.

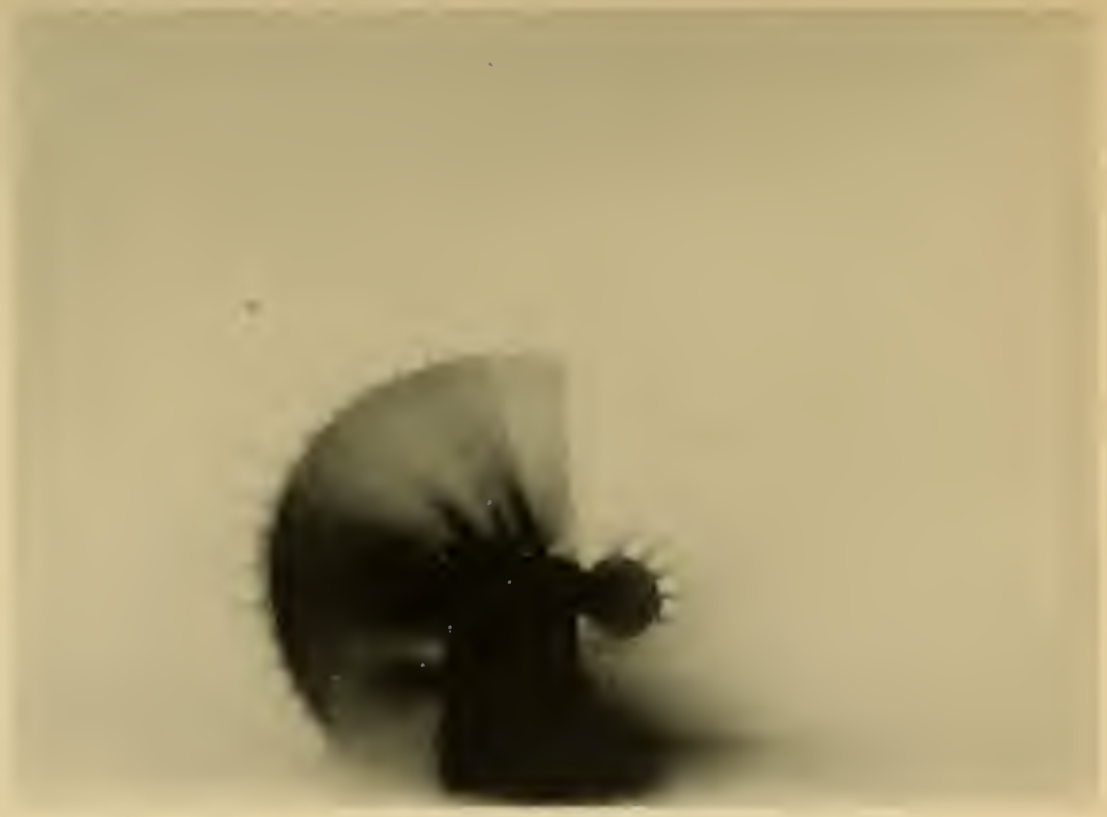
57 A 15-1-03.

58 A 10-1-03.

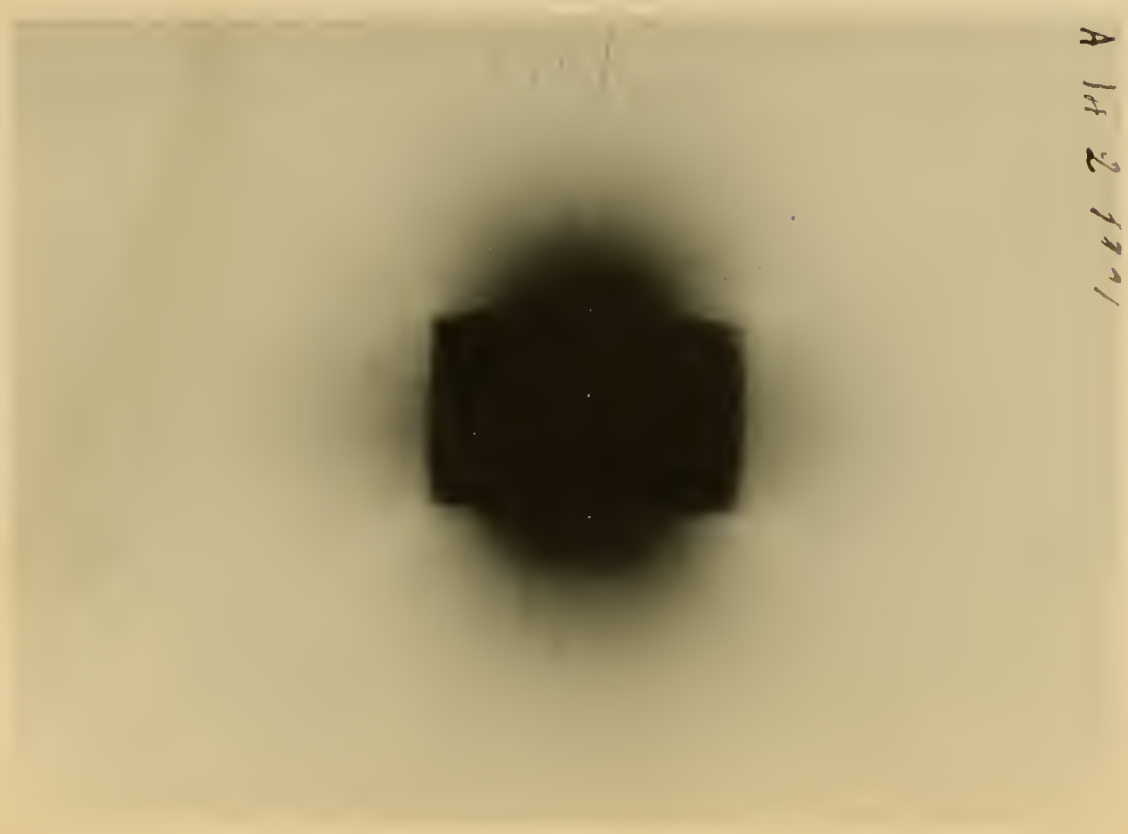
59 A 12-3-02.

60 A 4-5-03.

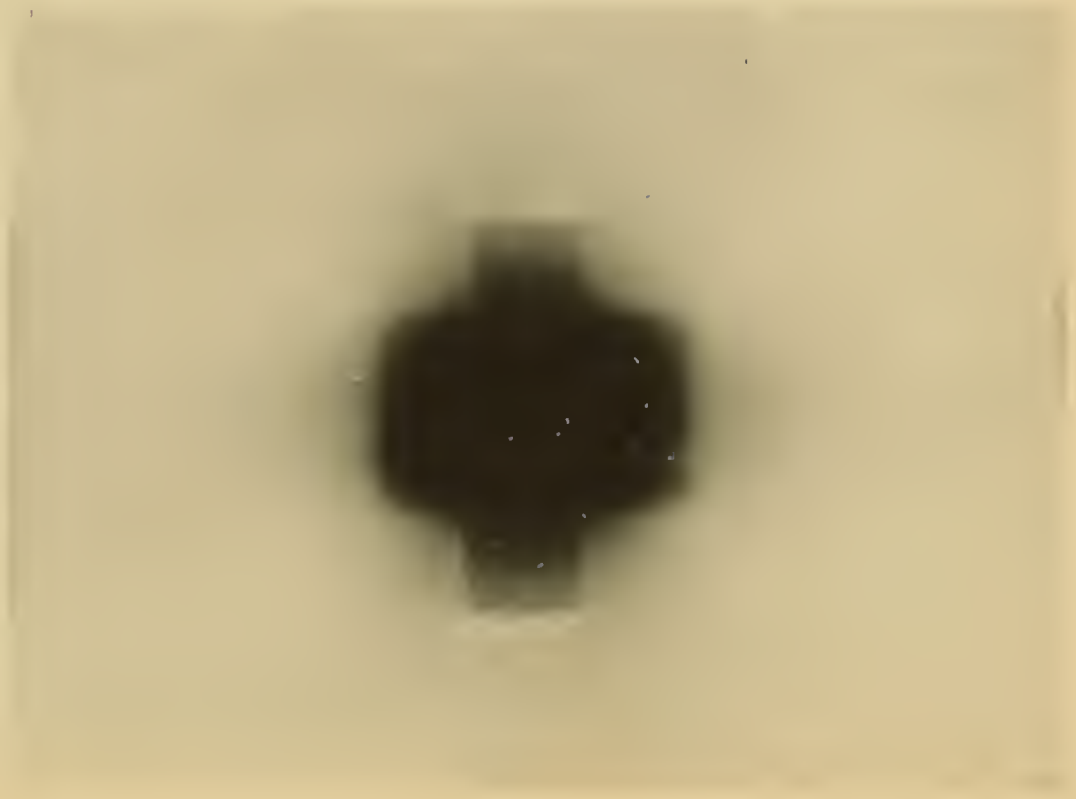
61



62 A 29-5-01.



63 A 14-2-01.



64 B 16-2-01.

65 (1) A 28 - 2 - 01

66 (2) A 28 - 2 - 01

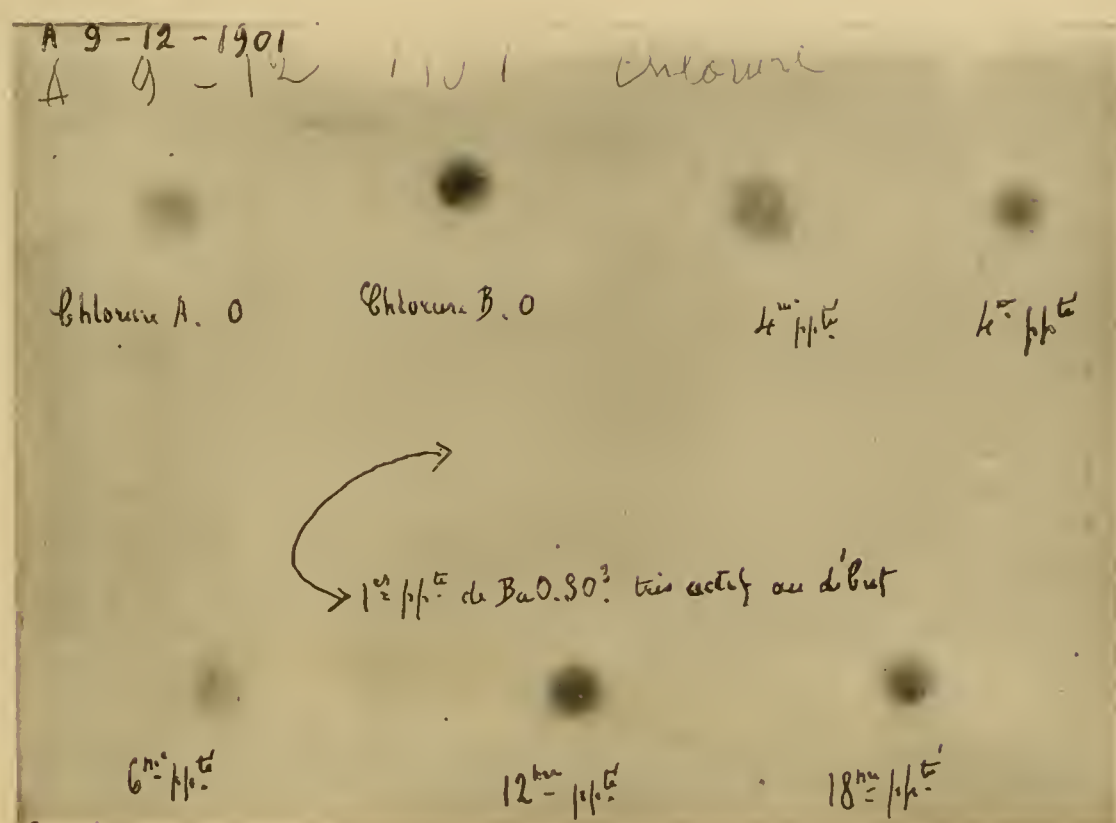
67 A 31 - 5 - 01

68 A 5 - 3 - 03

A 18-2-01
n° 1

Sulfate double
Uranium et potassium
Chlorure d'uranium
initial
fois
id. 2 fois
id. 3 fois
4 fois
5 fois
6 fois
7 fois
8 fois
9 fois
10 fois
11 fois
12 fois

70


A 9-12-1901
Chlorure
Chlorure A. O
Chlorure B. O
4mes pp.tes
4mes pp.tes
1es pp.tes de BaO.SO3 très actif au début
6mes pp.tes
12mes pp.tes
18mes pp.tes

71

243 **BECQUEREL** (Henri). Recherches sur une propriété nouvelle de la matière. Activité radiante spontanée ou **Radioactivité de la matière.** *Paris*, 1903, in-4, 2 ff., 360 pp. ch., 2 ff. n. ch. +13 planches, carton. impr. d'orig. 200 fr.

Edition originale (formant le T. XLVI des Mém. de l'Acad. des Sciences) de cet ouvrage capital du **savant français qui découvrit la radioactivité**. Orné de 13 planches photographiques hors texte.

Bel exemplaire.

Chez Dunod. Cat. XX Juin 1937

Date Due

~~MAR 25 1963~~			
~~[illegible] 20 '63~~			
~~[illegible] 3 '63~~			

Demco 293-5

Accession no.
HC
Author
Becquerel, . .H.
Recherches sur une
propriété nouvelle
Call no. HIST QC 721
1903B
locked